

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**TVORBA 3D MODELU PRAVČICKÉ BRÁNY A JEHO
INTEGRACE DO 2.5D TIN MODELU TERÉNU**

**DESIGN OF PRAVČICKÁ BRÁNA 3D MODEL AND ITS
INTEGRATION WITH 2.5D TIN TERRAIN MODEL**

Bakalářská práce

Ivo Brýdl

srpen 2012

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Lukáš Brůha

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Pardubicích dne 26. srpna 2012

.....
Ivo Brýdl

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Mgr. Lukáši Brůhovi za věnovaný čas, cenné konzultace, rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Správě Národního parku České Švýcarsko, zvláště pak Mgr. Oldřichu Holešinskému, za poskytnuté informace a data. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

Tvorba 3D modelu Pravčické brány a jeho integrace do 2.5D TIN modelu terénu

Abstrakt

Hlavním cílem této práce je vytvoření integrovaného modelu složeného z trojdimenzionální reprezentace skalního útvaru Pravčické brány a 2,5D TIN modelu okolního terénu. Bodové mračno z leteckého laserového skenování musí být klasifikováno na terénní a mimo-terénní prvky. Terénní body jsou základem TIN reprezentace terénu. Dále se práce zaměřuje na metody rekonstrukce 3D povrchu z bodového souboru získaného z pozemního skenování. Popisuje proces vytváření povrchu na bodovém mračnu pomocí Poissonovy rekonstrukční metody. Na konci jsou oba modely zorientovány a posunuty do reálného souřadného systému, aby vytvořily hybridní model pokrývající část Národního parku České Švýcarsko.

Klíčová slova: laserové skenování, DMT, 3D modelování, integrace

Design of Pravčická brána 3D model and its integration with 2.5D TIN terrain model

Abstract

The main goal of this thesis is to design integrated model containing a three-dimensional representation of Pravčická brána rock arch and 2.5D TIN model of surrounding terrain. Point cloud from airborne lidar measurements has to be classified into ground and non-ground features. The ground points are the basis of the TIN terrain representation. Second part of this thesis is focused on methods for reconstructing 3D surface from given points set retrieved with ground-based lidar measurement. The thesis describes the process of meshing point cloud with Poisson surface reconstruction. Finally, these two models are oriented and translated to real coordinates in order to form integrated hybrid model covering part of České Švýcarsko National Park.

Klíčová slova: laser scanning, DTM, 3D modelling, integration

OBSAH

Přehled použitých zkratk	6
Seznam obrázků, tabulek a grafů	7
1 Úvod	9
2 Úvod do problematiky	10
2.1 Laserové skenování	10
2.2 Konstrukce lidarů	10
2.3 Princip laserového měření vzdáleností	11
2.4 Faktory ovlivňující laserové skenování	12
2.5 Skenovací proces a sběr dat	13
2.6 Souřadný systém	14
2.7 Datové modely prostorové reprezentace	16
2.8 Vzorkování dat	18
2.9 Modelování povrchů	19
2.10 Klasifikace dat leteckého skenování	23
3 Metodika	26
3.1 Softwarové vybavení	26
3.2 Výběr aplikovaných algoritmů	30
3.3 Translace bodových souborů	32
4 Data	34
4.1 Bodové mračno z leteckého skenování	34
4.2 Bodové mračno z pozemního skenování	36
5 Praktická část	37
5.1 2,5D model terénu	37
5.2 3D model Pravčické brány	45
5.3 Integrace 3D modelu skalní brány do TIN modelu terénu	54
6 Diskuze a závěr	57
Seznam zdrojů	60
Seznam příloh	64

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

DMT	D igitální m odel t erénu
FOV	F ield o f v iew = zorný úhel
GPS	G lobal p ositioning s ystem = globální poziční systém
ICP	I terative c losest p oint = algoritmická metoda registrace mračen
MS	M icrosoft, softwarová firma
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku v USA
NATO	N orth A tlantic T reaty O rganization = Severoatlantická aliance, vojenský pakt
NOAA	N ational O ceanic and A tmospheric A dministration = úřad USA pro moře a atm.
P. brána	P ravčická b rána
PLY	P olygon F ile F ormat = formát souboru pro 3D data
TIN	T riangulated i rregular n etwork = nepravidelná trojúhelníková síť
TXT	T extový soubor, základní formát pro uchování textu
UTM	U niversal T ransverse M ercator = Mercatorovo zobrazení příčné válcové
VÚGTK	V ýzkumný ú stav g eodetický, t opografický a k artografický
WGS 84	W orld G eodetic S ystem 1984 = světový geodetický standard

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky

Obr. 1 Zakřivení paprsku refrakcí	12
Obr. 2 Diagramy odrazivosti hlavních typů povrchu.....	13
Obr. 3 Výškový rozdíl geoidu EGM2008 a elipsoidu WGS84.....	15
Obr. 4 Příklad Poissonova diskového rozdělení v rovině	19
Obr. 5 Příklad α -tvaru a D. triangulace.....	20
Obr. 6 Základní případy průsečíkové topologie.....	21
Obr. 7 Průběh algoritmu BPA v rovině rdini.....	21
Obr. 8 Poissonova rekonstrukce povrchu.....	22
Obr. 9 Ukázka rekonstrukce hlavy Davida.....	23
Obr. 10 Postup tvorby modelů.....	26
Obr. 11 Základní okno programu ALDPAT.....	28
Obr. 12 Okno ALDPAT pro volbu metody.....	28
Obr. 13 α -tvar pro různé hodnoty α	31
Obr. 14 Výsledek dvou parametrizací Marching cube algoritmu	31
Obr. 15 Výsledek práce algoritmu Ball Pivoting.....	32
Obr. 16 Časový atribut ve škále modrá – červená	34
Obr. 17 Datový soubor bodové sítě okolí P. brány.....	35
Obr. 18 Detailní výřez oblasti 10 × 10 m.....	35
Obr. 19 Datový soubor bodů Pravčické brány	36
Obr. 20 Průřez mračnem terénu v severojižním směru	38
Obr. 21 Nastavení parametrů filtru ATIN	38
Obr. 22 TIN po aplikaci automatického filtru.....	40
Obr. 23 Dialog Create TIN	41
Obr. 24 Lišta TIN Editing v aplikaci ArcMap.....	42
Obr. 25 Širší barevná škála usnadní ruční filtraci	43
Obr. 26 Pohled na odfiltrovaný TIN model terénu.....	44
Obr. 27 Schéma přípravy dat pro geokódování.....	44
Obr. 28 Parametry modelové funkce.....	45
Obr. 29 Translace datasetu Pravčické brány	46
Obr. 30 Zdrojové mračno bodů Pravčické brány.....	46
Obr. 31 Volba parametrů pro filtr Poisson disk Sampling.....	47
Obr. 32 Nástroj Align v programu MeshLab	48

Obr. 33 Výsledek hrubé orientace mračna P. brány	49
Obr. 34 Nastavení parametrů algoritmu ICP	50
Obr. 35 Matice transformace	50
Obr. 36 Velmi přesné ztotožnění po aplikaci algoritmu ICP	51
Obr. 37 Postup tvorby 3D modelu Pravčické brány.....	51
Obr. 38 Zadání parametrů pro výpočet normál	52
Obr. 39 Vypočtené normály na bodovém mračnu.....	52
Obr. 40 Parametry Poissonovy rekonstrukce povrchu.....	53
Obr. 41 Vliv hloubky octree na míru detailu.....	53
Obr. 42 Porovnání modelů s rozdílným rozlišením.....	54
Obr. 43 Spojovací tabulka pro translaci modelu	55
Obr. 44 Pohled na integrovaný 3D model	56

Tabulky

Tab. 1 Typická odrazivost povrchů z různých materiálů.....	13
Tab. 2 Zachování přesnosti při zpracovávání mračen.....	33
Tab. 3 Základní statistika bodového mračna okolí Pravčické brány.....	35
Tab. 4 Extrémy hodnot v mračnu Pravčické brány.....	36
Tab. 5 Finální volba parametrů pro filtr Adaptive TIN	39

Graf

Graf 1 Celková chyba při klasifikaci.....	25
---	----

KAPITOLA 1

Úvod

Moderní technologie skenování pomocí laserových paprsků s sebou přinesla možnost uchovávat tvar sledovaného objektu nebo terénu v podobě bodového mračka zaměřeného s velkou přesností. Používání této metody je v poslední době na vzestupu a doplňuje tak dnes již běžné techniky geodetických měření, fotogrammetrie a radarové interferometrie. V současnosti dokonce probíhá program leteckého skenování území ČR, jež zpřesní dosavadní velkoplošná výškopisná data.

Téma této bakalářské práce pro mě představovalo možnost blíže se seznámit s problematikou 3D modelování a prakticky vyzkoušet techniky tohoto složitého oboru, který aplikuje metody pokročilé matematiky a geometrie. Velkou motivací je také možnost přispět svým dílem do světa, kde 3D modely nacházejí stále větší uplatnění.

V mé práci se pokusím představit poznatky o oboru laserového skenování, uvést předpoklady pro tvorbu modelu a v jednoduchosti popsat základní principy datových struktur a modelovacích technik pro utváření a ukládání 3D modelů.

Hlavním cílem mé práce je vytvoření a integrace 3D modelu Pravčické brány do digitálního modelu terénu blízkého okolí. V tomto ohledu bude nutné seznámit se s dostupnou literaturou v dostatečném rozsahu. Dílčími úkoly budou volba vhodných software, nalezení optimálních metod pro filtraci dat a vytvoření prostorové reprezentace terénu v okolí Pravčické brány. V další fázi vytvořím pomocí modelovacích algoritmů realistický model tohoto známého skalního útvaru.

KAPITOLA 2

Úvod do problematiky

2.1 Laserové skenování

V oboru laserového skenování zemského povrchu dochází v posledních letech k výraznému vývoji, a proto se stává velmi důležitou technologií pro získávání prostorových dat. Skenování může probíhat jak z pozemního stanoviště, tak z leteckého nosiče, což dovoluje sbírat data ve velkém objemu a s dostatečnou přesností (Shan; Toth, 2008).

Ačkoli byl laser vynalezen již v 60. letech 20. století, kvůli nedostatku dalších podpůrných technických prostředků bylo efektivní využití pro mapování umožněno až o bezmála 30 let později. Během této doby probíhal výzkum a vývoj příslušných technologií, na kterých se z velké části podíleli i vědci z amerického úřadu NASA. S dostupností vhodných skenovacích přístrojů nastal v 90. letech ohromný rozvoj leteckého laserového skenování, čemuž pomohla nová metoda přímého georeferencingu¹ s využitím GPS a dále také využití potenciálu výpočetní techniky (Cramer, 2001).

V oblasti mapování zemského povrchu se využívá tzv. lidar, což je přístroj měřící vzdálenost za pomoci laserových paprsků. Dle Bachmana (1979, s. 2) je pojem lidar akronym pocházející z počátečních písmen anglického sousloví „light detection and ranging“. Alternativně se využívá i akronym ladar, který vychází z „laser detection and ranging“. V anglicky psané literatuře se tato slova často píší verzálkami – LIDAR nebo LADAR.

2.2 Konstrukce lidarů

Typický skenovací přístroj se skládá ze zdroje laserového záření, optické soustavy, mechanického prvku, detektoru elektromagnetického záření a přesných hodin. V současné době se jako zdroj elektromagnetického záření používají polovodičové diodové lasery a Nd:YAG lasery buzené polovodičovou diodou. Tyto emitory vytvářejí záření o vlnové délce v pásmu od 800 nm do 1600 nm. Detektory zpětných odražených signálů jsou

¹ Metoda přímého georeferencingu umožňuje zasazení prostorových dat do pozemní souřadnicové soustavy, zjednodušení aerotriangulace a získání prvků vnější orientace s využitím systému měření polohy GPS (Cramer, 2001).

nejčastěji tvořené PIN nebo lavinovými fotodiodami, které musí být velmi citlivé (Wehr; Lohr, 1999). „Citlivost je zde velmi důležitá proto, že vyslaná energie světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti, budeme-li uvažovat difúzní odraz.“ uvádí Dolanský (2004, s. 10). Optickou soustavu tvoří jedno nepropustné a jedno polopropustné zrcadlo (kterým projde paprsek po získání dostatečné energie) a další optické prvky pro usměrnění toku (Shan; Toth, 2008).

2.3 Princip laserového měření vzdáleností

Jak již bylo uvedeno, laserové skenovací přístroje fungují na principu emitování elektromagnetického záření a přesného měření času. Emitor a detektor jsou ve skeneru umístěny, takovým způsobem, aby byl ozářený bod na Zemi v zorném poli (FOV) detektoru. Ačkoli laserové paprsky prochází velmi kvalitní optickou kolimační soustavou, která se snaží zajistit maximální možnou míru rovnoběžnosti paprsků, přesto dochází k divergenci paprsků, která je více patrná se zvětšováním vzdálenosti, kterou paprsek musí urazit (Shan; Toth, 2008). Divergence paprsků proto definuje okamžité zorné pole (IFOV) optického detektoru. Hodnoty IFOV běžně dosahují hodnot od 0,3 mrad do 2 mrad (Wehr; Lohr, 1999). Při výšce skeneru 500 m nad Zemí bude mít laserová stopa velikost okolo 30 cm. Toto rozšíření paprsku umožňuje detekci vícenásobných odrazů, např. od korun stromů až po odraz od terénu (Dolanský, 2004). Velikost stopy, kterou laserový paprsek ozáří povrch Země je závislá na divergenci laserových paprsků a na výšce, ze které je prováděno skenování. Pro samotné měření vzdálenosti mezi skenerem a místem odrazu se využívají dvě odlišné metody, jak zmiňují Shan a Toth (2008).

Tou první je přesné měření času, který urazí velmi krátký, avšak intenzivní puls laserového paprsku vyslaného z laserového skeneru, jenž se následně odrazí od dosaženého objektu a dorazí zpět do zařízení, kde se zaznamená čas. Je tedy znám čas mezi vysláním a příjmem paprsku a díky jednoduché fyzikální formuli je možné získat vzdálenost objektu, která je rovna polovině času mezi emisí a příjmem laserového pulsu vynásobenou rychlostí elektromagnetického záření, která je velmi dobře známa jako hodnota rychlosti světla (Shan; Toth, 2008).

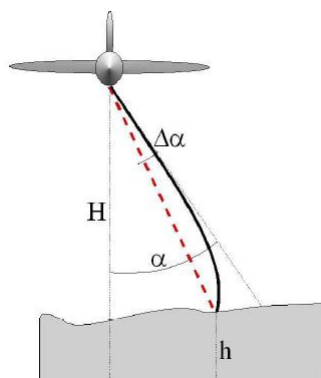
Druhou měřicí metodou je kontinuální vysílání laserového paprsku namísto pulsů. V tomto případě je analyzován vzorek vyslané a přijaté amplitudově modulované elektromagnetické vlny a zkoumá se fázový posun mezi těmito dvěma vlnami. Nosný signál laserového paprsku představuje vlnění o vysoké frekvenci a malé vlnové délce okolo 1 μm , což odpovídá blízkému infračervenému záření. Kvůli přesnějšímu měření je tato nosná vlna amplitudově modulována sinusoidním modulačním signálem, přičemž nedochází ke změně frekvence ani fáze nosné vlny. Změny modulačního signálu dávají informaci o celočíselném počtu vln mezi laserem a objektem. Díky znalosti vlnové délky paprsku a fázovému posunu na přijímači je potom možné vypočítat vzdálenost objektu (Shan; Toth, 2008).

2.4 Faktory ovlivňující laserové skenování

2.4.A. Atmosférická refrakce

Změnu dráhy paprsků způsobuje rozptyl v atmosféře, neboť změny vzdušného tlaku, teploty, vlhkosti a další faktory vytvářejí prostředí s proměnlivou optickou hustotou, v níž dochází ke změnám směru paprsků (Pavelka, 2009). Nejlepších výsledků bývá dosahováno během noci při nízkých teplotách atmosféry, nízké vlhkosti a nízkých koncentracích CO_2 a prachových částic. Velké znečištění atmosféry způsobuje nežádoucí ztrátu energie paprsku, což zapříčiní zhoršenou zpětnou registraci na detektoru nebo případně chybné náhodné odrazy (Baltsavias, 1999).

Chyba způsobená atmosférickou refrakcí závisí na vlnové délce záření, úhlu průchodu paprsku atmosférou a na již zmiňovaných vnějších podmínkách. Projevuje se zakřivením paprsku, jak ukazuje obr. 1. Odchylka $\Delta\alpha$ je přímo úměrná úhlu α , z čehož vyplývá, že nejvíce vychýlené paprsky jsou na okrajích skenovacího pásu a naopak nulová refrakce je v nadiru. Z tohoto důvodu se používají různé refrakční modely, pro vyrovnaní této chyby (Dolanský, 2004). Lze tedy konstatovat, že s rostoucí vzdáleností, kterou musí laserový paprsek překonat, stoupá také míra refrakce tohoto paprsku (Shan; Toth, 2008).



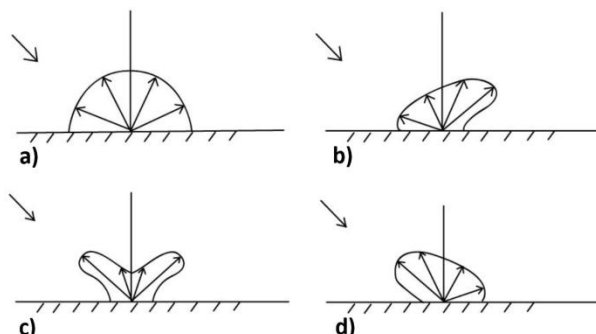
Obr. 1 Zakřivení paprsku refrakcí (zdroj: převzato z Dobrovolný, 2004, s. 23)

2.4.B. Odrazivost paprsku

Odrazivost je další důležitý aspekt v rámci laserového skenování a určuje se jako podíl intenzity odraženého záření k součtu intenzity záření absorbovaného, prošlého a propuštěného. Důležitým faktorem je úhel dopadu paprsku na povrch či objekt a následný charakter odrazu, který je vyjádřen digramem odrazivosti. Podle tvaru tohoto diagramu je možné rozeznat 4 hlavní druhy povrchů (Kolář; Halounová; Pavelka, 1997):

- Difúzní povrchy (obr. 2a) záření odráží rovnoměrně do všech směrů, a proto je koeficient záře ve všech směrech konstantní. Příkladem tohoto typu povrchu může být písek nebo čerstvý prachový sníh.
- Zrcadlové povrchy (obr. 2b) odrážejí na základě zákona odrazu, kdy se úhel dopadu rovná úhlu odrazu (Comnios, 2006). Reálně tak mají maximum koeficientu záře ve směru úhlu odrazu. Charakteristickým povrchem je led, vodní hladina nebo skalní bloky.

- c) Kombinované povrchy (obr. 2c) v sobě spojují vlastnosti difúzních a zrcadlových povrchů. Objevují se zde tedy dvě maxima koeficientu záře.
- d) Rýhované povrchy (obr. 2d) jsou takové, které odrážejí záření nejvíce ve směru dopadu a představují různé vegetační kryty.



Obr. 2 Diagramy odrazivosti hlavních typů povrchu (zdroj: převzato z Kolář; Halounová; Pavelka, 1997)

Odrazné vlastnosti povrchů mají však odlišnou charakteristiku při použití různých vlnových délek laserového paprsku. V oblasti dálkového průzkumu země jsou odrazné vlastnosti prozkoumány velmi podrobně, založené jsou však na měření nekoherentního záření pocházejícího ze Slunce. Naproti tomu koherentní laserové paprsky mohou vykazovat i velmi odlišnou odrazivost na stejném typu povrchu (Shan; Toth, 2008). Odrazivost při vlnové délce 900 nm pro vybrané typy difúzních povrchů je uvedena v tabulce 1.

Tab. 1 Typická odrazivost povrchů z různých materiálů (zdroj: upraveno dle Lohr a Wehr, 1999)

Povrch	Odrazivost (%)
Opracované dřevo (z borovice, čisté, suché)	94
Vápenec, jíl	až 75
Opadavé stromy	typ. 60
Jehličnaté stromy	typ. 30
Plážové písky, pouštní písky	typ. 50
Beton	24
Asfalt	17
Láva	8

2.5 Skenovací proces a sběr dat

Laserová skenovací jednotka měří pouhou délku k bodu na povrchu a úhel, pod kterým bylo zaměření provedeno. Pro určení polohy tohoto bodu musí být skenovací systém osazen polohovým a orientačním systémem (POS), pomocí kterého je možné dopočítat přesné souřadnice bodů v referenčním souřadnicovém systému. Jelikož skenování

povrchu dosahuje přesností lepších než 10cm, je nutné, aby i polohová informace dosahovala podobné přesnosti. Tohoto je dosaženo právě pomocí POS, který je složen z diferenciální GPS jednotky² a inerciální měřicí jednotky, která měří aktuální hodnoty zrychlení a úhlových změn orientace s využitím akcelerometru a gyroskopu. Je důležité oddělit dva samostatné záznamy: přesné časové údaje GPS a lokální časové údaje laserového skeneru. K synchronizaci dochází až později v off-line režimu. Jelikož GPS obsahuje velmi přesné hodiny typu PPS (z anglického PPS – pulse per second, puls za sekundu), dosahuje se tak maximální chyby 10 μ s. Po synchronizaci časových systémů dojde ke spárování dat o poloze s laserovým měřením a uložení těchto informací na záložní jednotku. Data jsou posléze analyzována také off-line. Pro určení polohy bodů je nejprve nutné určit prvky vnější orientace, podle kterých se zjistí přesná poloha snímače v daném čase. Souřadnice skenovaných bodů se poté určí na základě naměřené vzdálenosti, skenovacího úhlu a kalibračních dat. Datový soubor je následně zpracován do podoby mračna bodů (Wehr; Lohr, 1999).

2.6 Souřadný systém

2.6.A. Polohový systém WGS 84 a zobrazení UTM

Souřadné systémy jsou definovány pro jasné určení polohy bodu na referenční ploše pomocí dvojice souřadnic. Referenční plochou je takové těleso, které se svým tvarem blíží tvaru Země. Vzhledem ke komplexnosti zemského povrchu je Země nahrazována matematicky definovanými referenčními plochami, jako je elipsoid, koule nebo rovina. Při převodu souřadnic z referenční plochy do mapy se využívá matematických metod ve formě tzv. kartografického zobrazení, které každému bodu na referenční ploše přiřadí právě jeden bod na cílové ploše (Voženílek, 2004).

V průběhu práce používám výhradně systém polohových souřadnic WGS 84, což je světový geodetický geocentrický systém. Je tvořen pravotočivou kartézskou soustavou souřadnic a referenčním elipsoidem WGS 84. Celosvětově je využíván systémem určování polohy GPS a armádami členských států NATO (VÚGTK, 1998).

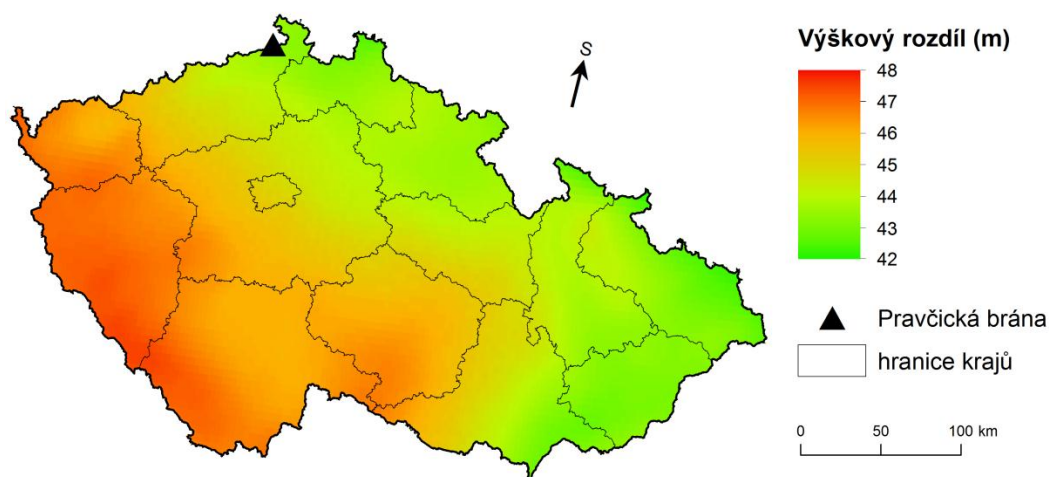
Na zmíněném elipsoidu WGS 84 je definované zobrazení UTM. Jedná se o Mercatorovo konformní válcové zobrazení v příčné poloze. Skládá se celkem z 60 poledníkových pásů (každý o zeměpisné délce 6 stupňů), které jsou zvlášť zobrazeny na plášť válce a mají proto vlastní souřadnicový systém. Celé zpracovávané území v okolí Pravčické brány leží, stejně jako většina území České republiky, v pásu 33. Pouze Slezsko na východě zasahuje i do pásu 34 (Terminologický slovník VÚGTK, cit. 2012).

² Diferenciální GPS je nadstavba globálního polohového systému. Umožňuje zpřesnění polohy udávané systémem GPS pomocí využití referenčních stanic GPS s přesně danou polohou (Terminologický slovník VÚGTK, cit. 2012).

2.6.B. Výškový systém

Výškový systém netvoří s polohovým systémem ucelený systém a je potřeba se na něj dívat poněkud odlišně. Běžně se odkazujeme na nadmořskou výšku, což je v případě ČR „vzdálenost bodu od střední hladiny moře měřená podél tížnice“, jak uvádí Terminologický slovník VÚGTK (cit. 2012). V ČR jsou výšky vztaženy k výškovému systému baltskému – po vyrovnání (Cimbálník; Zeman; Kostelecký, 2007).

U dat zaměřených pomocí GPS je výšková souřadnice vyjádřena jako „vzdálenost bodu od elipsoidu měřená podél kolmice od elipsoidu k tomuto bodu“ (Terminologický slovník VÚGTK, cit. 2012) a nazývá se elipsoidická výška. Referenční elipsoid WGS 84 (výšky GPS) a geoid (který rámcově odpovídá střední hladině moře) jsou od sebe v každém místě na Zemi odchýleny o určitou vzdálenost. Výškovou odchylku na území ČR mezi elipsoidem WGS 84 a geoidem EGM 2008 ukazují na obr. 3.



Obr. 3 Výškový rozdíl geoidu EGM2008 a elipsoidu WGS84 (zdroj: vlastní tvorba s využitím dat Geoid EGM 2008 GIS Data, cit. 2012)

2.6.C. Prostorová transformace souřadnic

Jedním z dílčích cílů této práce je integrovat obě bodová mračka, k čemuž se využije prostorová transformace souřadnic. Transformace se při laserovém skenování využívají při převodu z lokálního souřadného systému do systému reálných referenčních souřadnic. Tyto dvě soustavy se mezi sebou mohou lišit posunutím (translací), otočením okolo třech souřadných os (x, y, z) a měřítkem, které může být odlišné v každém směru. Převod je popsán následujícím výrazem:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + M \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

kde parametry X, Y, Z značí souřadnice v referenčním systému, modelové souřadnice jsou x, y, z . Hodnoty $\Delta X, \Delta Y$ a ΔZ definují posun podél souřadných os. Parametr M značí měřítko (skalár pro jednotnou změnu měřítka nebo měřítková matice) a R je matice rotace (Pavelka, 2009).

Transformace může probíhat ve dvou rovinách. V prvním případě známe transformační klíč a vypočteme cílové souřadnice. Druhý případ řeší hledání transformačního klíče mezi známými hodnotami zdrojových a cílových souřadnic, do čehož vstupuje vyrovnaní. Transformační předpis je možné vypočítat po volbě tzv. vlíčovacích bodů (Pavelka, 2009).

2.6.D. Registrace metodou ICP

Při orientaci bodových mračen odlišného původu narážíme na problém, kdy nám obyčejná transformace pomocí vlíčovacích bodů nepřinese kvalitní výsledky. Je to způsobené diskrétní povahou mračen a jejich rozdílnou hustotou, která v některých případech znemožňuje výběr identických bodů v obou mračnech. Existuje však algoritmický přístup, který bodová mračna porovná v několika iteracích a zajistí velmi dobré lícování.

Besl (1992) popsal přesnou metodu pro registraci 3D mračen založenou na algoritmu Iterative Closest Point (ICP). Metoda se snaží najít prostorovou transformaci pro testované mračno, aby přesně lícovalo s modelovým mračnem. Předpokladem jsou částečně zorientovaná mračna, přičemž metoda v podstatě doladí výsledek. Iterace probíhá následovně. Vytvoří množinu dvojic nejbližších bodů mezi oběma mračny a hledá transformaci, jež minimalizuje střední kvadratickou odchylku vzdáleností těchto dvojic. Nalezenou transformaci aplikuje na testované mračno. Tento postup se opakuje v předem určeném počtu iterací nebo se ukončí po dosažení požadované střední kvadratické odchylky (Schütz; Hügli, 1995).

2.7 Datové modely prostorové reprezentace

Data, se kterými pracujeme v geoinformatice, jsou běžně dvoudimenzionálního (2D) nebo trojdimenzionálního (3D) charakteru. Lidská představivost si lépe poradí s 2D daty, které mají jednodušší údržbu, protože nepotřebují složitou datovou strukturu a topologii jako 3D systémy. Ty se do popředí zájmu dostaly později s nástupem nových metod a technologického vybavení. Prostorová data můžeme rozdělit na 3 typy:

- a) 2D – reprezentují polohu v rovině.
- b) 2,5D – k souřadnicím x, y se připojuje právě jeden atribut výšky z .
- c) 3D – jsou definována souřadnicemi na třech souřadných osách x, y, z (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

Nejvíce rozšířené jsou 2D reprezentace, které generalizují reálné pozemské objekty a zobrazují je ve třech základních prvcích, jimiž je bod, linie a polygon. Těmito rovinnými prvky se však nedají popsat reálné prostorové objekty. Částečně v tomto ohledu napomohlo přiřazení atributu elevace, ale ani 2,5D model nestačí na reprezentaci reálných objektů, jako je třeba jeskyně nebo skalní oblouk Pravčické brány (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

Li (1994) dělí reprezentaci prostorových objektů na povrchovou a objemovou. Povrchová reprezentace se skládá z prvků: mřížka, tvarový model, facetový model a hraniční reprezentace (B-rep). Objemovou reprezentaci tvoří 3D pole, oktantový strom (octree), konstruktivní geometrie těles (CSG) a 3D TIN. Kolektiv Žára ... [et. al.] (2005) dělí modelování objektů do třech kategorií. Tou první je hraniční a plochová reprezentace, druhou objemová reprezentace a třetí je procedurální modelování. Stoter a Zlatanova (2003) určují čtyři typy organizace 3D objektů: CSG, voxelová reprezentace, 3D TIN a hraniční reprezentace. Na dalších řádcích se pokusím stručně shrnout jednotlivé přístupy.

2.7.A. Hraniční, povrchové a bodové modely

Hraniční reprezentace těles (B-rep) popisuje hranice objektu množinou hraničních bodů, ale neuchovává žádnou informaci o vnitřní struktuře (Žára ... [et al.], 2005). Používá jednoduché tvary jako hrany, plochy, kružnice. Existuje objemová nadstavba tohoto modelu popisovaná např. krychlí, válcem atp. (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

Drátový model je nejstarší metodou a využívá k popisu pouze vrcholy a hrany. Vzhledem k chybějící topologii je nejednoznačně interpretovatelný. Má výhodu při zobrazování, protože je vidět skrz dráty modelu na vnitřní strukturu (Žára ... [et al.], 2005).

Mřížka je tvořena body nebo pixely a používá se spíše v rastrovém vyjádření. Pravidelně rozložené body (pixely) ve čtvercové mřížce mají známou polohu a nesou atributovou informaci, což může být např. hodnota výšky. Výhodou je jednoduchost a implicitní topologie daná pravidelností (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

Facetový model popisuje objekt mnohoúhelníkovými ploškami, jejichž hrany se neprotínají. Nejčastěji využívané jsou trojúhelníkové plošky, od nichž je odvozen název pro nepravidelnou trojúhelníkovou síť (TIN). Tato síť je tvořena nepravidelně rozmístěnými body (uzly) s danými souřadnicemi (x, y) a každý tento uzel má přiřazenu hodnotu elevace (z). Trojúhelníková síť je nad body vytvořena triangulační technikou, např. nepoužívanější Delaunayovou triangulací. Model TIN často slouží jako digitální model terénu (DMT). Výhodou je schopnost uchovat detail v místech s velkými změnami křivosti a naopak nezatěžovat datový prostor zbytečně hustou sítí bodů v rovinných oblastech (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

2.7.B. Objemové modely

Oktantový strom (octree) je zástupcem objemové reprezentace. Jedná se o prostorovou analogii k 2D kvadrantovému modelu (quadtree). Založen je na binárním hierarchickém systému, kdy se 3D prostor (bounding box³) dělí na 8 stejných menších krychlí, které se

³ Bounding box neboli ohraničující obálka. Objekt je ohraničen tělesem s jednoduchou geometrií. Osově zarovnaný kvádr má hrany rovnoběžné s osami souřadnic. Orientovaný kvádr obklopuje objekt tak, aby měl nejmenší objem (Žára ... [et al.], 2005).

dále dělí stejným způsobem až do požadované hloubky (Chalupecký, 2005). Krychle, které neobsahují těleso, jsou ze stromové struktury vyřazeny, ale i přesto je model velmi datově náročný (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

Konstruktivní geometrie těles (CSG) je často využívána v systémech CAD a objekty reprezentuje kombinací předdefinovaných geometrických primitiv, jako je kvádr, koule, kužel atp. Model je popsán CSG stromovou strukturou a kopíruje postupy při návrhu tělesa člověkem (Žára ... [et al.], 2005). Při popisu se používají geometrické transformace a Booleovské operace sjednocení, průnik nebo odečtení (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

3D TIN (čtyřstěnná síť, TEN) je nadstavbou 2,5D systému TIN. Popisuje objekt spojenými, nepřekrývajícími se čtyřstěny, které se skládají ze 4 bodů a 6 hran. Jednoduchá datová struktura je tak schopna vyjádřit bod, linii, plochu i objem. Implementace v GIS aplikacích je však zatím minimální. (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

3D pole je trojrozměrná diskrétní množina krychlí nebo kvádrů rozmístěných do pravidelné mřížky. Tyto elementy nazývané voxely vznikly jako analogie 2D pixelů (Žára ... [et al.], 2005). Metoda se nehodí pro reprezentaci objektů ve vysokém rozlišení, protože zabírá velký datový prostor (Abdul-Rahman; Pilouk, 2008).

2.8 Vzorkování dat

Přestože by bylo ideální uchovávat veškeré 3D modely v maximálním rozlišení, není to vždy možné. Limitování můžeme být datovým prostorem, nekvalitním skriptem nebo nedostačujícím hardwarovým vybavením. Než začneme vytvářet samotný 3D model, je vhodné zamyslet se nad budoucím využitím a tomu přizpůsobit zdrojová data. Pokud je původní bodové mračno příliš husté, je žádoucí použít metodu pro zmenšení hustoty dat, která by zajistila zmenšení datového objemu za cenu určité ztráty prostorového rozlišení.

Základní úlohou vzorkování bodů je najít N vzorků v jednotkovém čtverci. Shirley (1991) uvádí výčet některých metod vzorkování běžně používaných v počítačové grafice. Metody se dělí na pravidelné a stochastické, čili náhodné:

Pravidelné vzorkování (regular sampling) jednoduše vybírá vzorky na pravidelné mřížce, čímž zabrání vytváření shluků. Nevýhodou je, že neodstraní rušivé elementy (Shirley, 1991).

Další uvedené postupy patří do kategorie stochastických vzorkovacích metod:

Náhodné vzorkování (random sampling) spočívá v generování náhodných čísel s rovnoměrným rozložením pravděpodobnosti výskytu na intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a jejich nezávislé přiřazování souřadnicím. Na základě těchto souřadnic jsou vybírány vzorky. Má tendenci k vytváření shluků (Shirley, 1991).

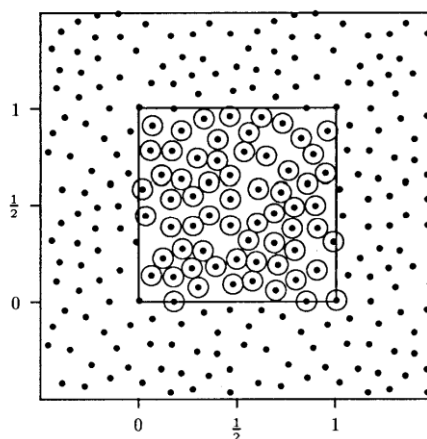
Roztřesení (jittering) rozdělí rovinný prostor na tzv. superpixely, do jejichž středů generuje vzorky. V rámci superpixelů jsou vzorky ze středu buňky náhodně posouvány o hodnoty s rovnoměrným rozložením a tím dojde k roztřesení. V superpixelech jsou tak

vzorky rozmístěny náhodně a v globálním pohledu poměrně rovnoměrně. Extrémní případ shluku nastane v případě setkání 4 vzorků v rozích superpixelů (Žára ... [et al.], 2005).

Částečné roztřesení (semijittering) eliminuje vadu klasického roztřesení tím, že bod ze středu superpixelu posunuje max. o $\frac{1}{4}$ délky jeho hrany. Tak zabrání setkání roztřesených bodů v rozích za cenu větší globální uniformity (Shirley, 1991).

N-věží (N-rooks) tvoří určitý mezičlánek mezi pravidelnými a stochastickými metodami. Podobá se úloze ze hry v šachy, jak rozmístit N věží, aby se vzájemně neohrožovaly. Všechny možné způsoby určuje permutace diagonály a z těchto permutací se náhodně vybírá jedna jako vzorek. Na body je možné dále aplikovat roztřesení (Žára ... [et al.], 2005).

Poissonovo diskové vzorkování (Poisson disk sampling) vychází z Poissonova rozdělení, které má náhodná veličina nabývající hodnot kladných celých čísel, což je shora neomezený interval diskrétních hodnot. Poissonovo rozdělení je známé také jako zákon vzácných jevů a řídí se jím četnosti jevů s malou pravděpodobností výskytu – proto vzácné jevy. Pro velký počet jevů dobře nahrazuje binomické rozdělení pravděpodobnosti (Zvára, 2006). Zvláštním případem je Poissonovo diskové vzorkování, kde dva body náhodně rozmístěné v prostoru k sobě nejsou blíže, než je minimální prahová vzdálenost. Toto speciální vzorkování zabraňuje vzniku shluků při zachování náhodné distribuce (McCool; Fiume, 1992). Nákres modelové situace v rovině je možné zhlédnout na obr. 4.



Obr. 4 Příklad Poissonova diskového rozdělení v rovině (zdroj: převzato z McCool; Fiume, 1992)

2.9 Modelování povrchů

V současnosti již existuje velké množství metod pro rekonstrukci povrchu z konečné množiny diskrétních bodů. Vytvořený povrch je reprezentován sítí složenou z konvexních polygonů, které sdílejí své hrany. Nejčastěji jsou používány trojúhelníky a čtyřúhelníky. Takto definovaná síť se v oboru počítačové grafiky nazývá *mesh* (Žára ... [et al.], 2005).

V dalším textu uvádím popis několika modelovacích postupů, které jsou v literatuře často zmiňované.

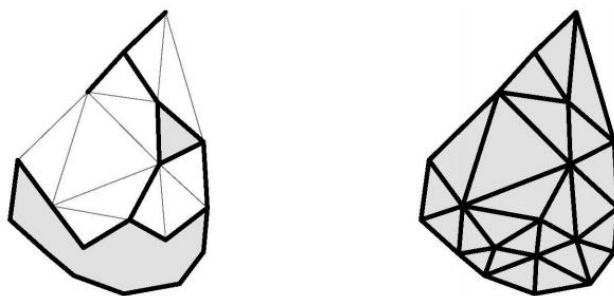
2.9.A. Delaunayova triangulace

Triangulační metoda nepatří mezi algoritmy, které odhadují tvar povrchu v 3D prostoru. Na druhou stranu by neměla chybět ve výčtu proto, že se jedná o nejčastěji používanou triangulační techniku. Triangulaci totiž při finální tvorbě povrchu využívají i rekonstrukční algoritmy. Definujme množinu bodů, nad kterými chceme triangulovat. Delaunayův postup nad touto množinou generuje trojúhelníkovou síť, kde v kružnici opsané libovolnému trojúhelníku neleží žádný další bod (Bayer, 2008).

2.9.B. Trojrozměrný α -tvar

Tento postup nalezení tvaru z daného bodového mračka v Euklidovském prostoru uvedli Edelsbrunner a Mücke (1994), když rozšířili v té době řešenou 2D variantu na euklidovský \mathbb{R}^3 prostor. Základní myšlenkou modelování je α -tvar jako zobecněný případ konvexní obálky množiny bodů (Edelsbrunner; Mücke, 1994). V \mathbb{R}^2 představuje konvexní obálka konvexní mnohoúhelník s nejmenší plochou, obsahující konečnou množinu bodů (Bayer, 2008).

Detailnost α -tvaru určuje parametr α . Když $\alpha = \infty$, α -tvar představuje konvexní obálku a se zmenšováním hodnoty α se v povrchu tvoří díry, až pro $\alpha = 0$ je α -tvarem právě vstupní bodová množina. Algoritmus kolem každého bodu vytvoří sféru koule o poloměru α . Pokud se v této sféře nachází jiný bod, je zařazen do množiny tvořící výsledný α -obal. Proces končí výpočtem Delaunayovy triangulace. Na obrázku 5 je příklad α -tvaru a triangulace. (Edelsbrunner; Mücke, 1994).



Obr. 5 Příklad α -tvaru a D. triangulace (zdroj: Novotný, 2007, s. 17)

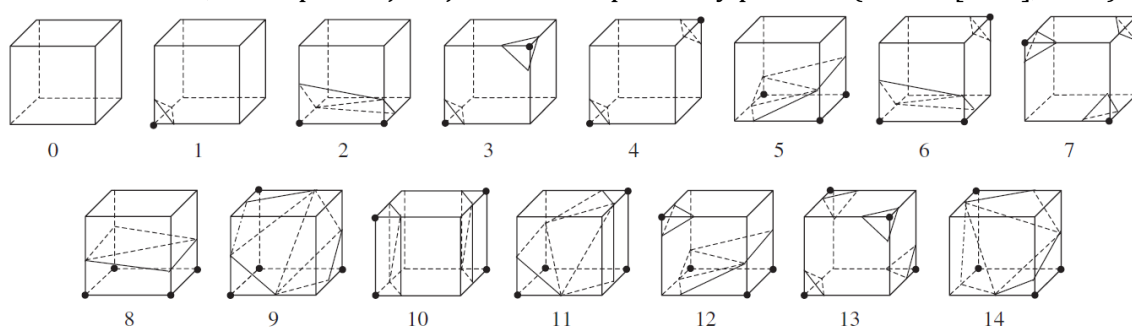
2.9.C. Marching cubes

Tato hojně používaná metoda tvorby izoploch představená v roce 1987 Lorensenem a Clinem, je nazývána také jako *pochodující kostky*. Izoplocha je definována jako síť, sestavená ze vzorků, které mají hodnotu skalární funkce v \mathbb{R}^3 rovnu izohodnotě α (Newman; Yi, 2006).

Do algoritmu vstupují data v objemové reprezentaci jako 3D mřížka a prahová izohodnota α . Mřížka je procházena v řezech po jednotlivých krychlích. Hodnoty ve vrcholech krychle jsou binárně ohodnoceny porovnáním s prahovou hodnotou α . Pokud je

hodnota menší než α , je vrchol uvnitř izoplochy. Naopak vrchol s větší hodnotou než α je vně. Krychle, jejichž všechny vrcholy jsou uvnitř resp. vně, jsou vyřazeny. Existuje tedy 2^8 kombinací ohodnocení vně/uvnitř a tedy i 256 kombinací průchodu izoplochy skrz krychli. Díky symetrii krychle se však všechny potřebné kombinace dostanou natočením a inverzí patnácti základních konfigurací (viz obr. 6). Je vytvořen seznam protnutých hran a interpolací na hraně se zjistí průsečík s izoplochou. Tyto průsečíky jsou vrcholy trojúhelníků, které vytvoří mesh. V posledním kroku algoritmus vypočte normály. (Žára ... [et al.], 2005).

Nevýhodou této metody je produkce velkého množství trojúhelníků a také fakt, že triangulaci určují pouze hodnoty z osmi vrcholů krychle a chybí pohled na globální charakter tělesa, což zapříčiňuje nejednoznačné průchody povrchu (Žára ... [et al.], 2005).

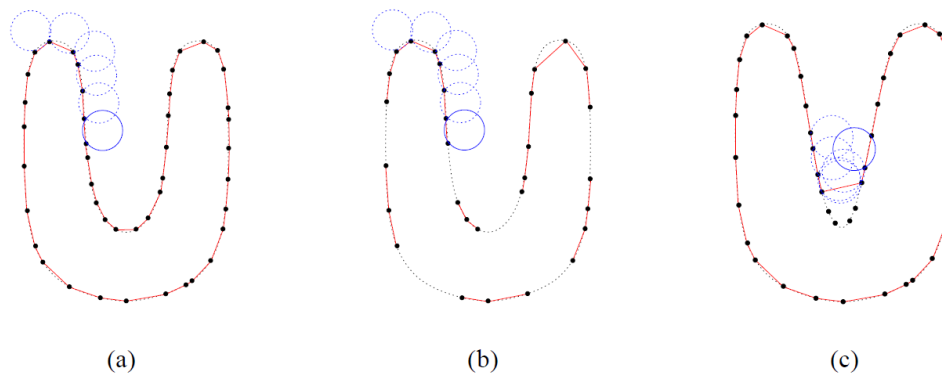


Obr. 6 Základní případy průsečíkové topologie (zdroj: převzato z Newman; Yi, 2006)

2.9.D. Ball pivoting

Algoritmus Ball Pivoting (BPA) popsal Bernardini [et al.] (1999) t. č. ze společnosti IBM. Metoda je založena na jednoduchém principu koule rotující okolo bodu, z čehož vznikl její název.

Hlavním elementem je koule o poloměru ρ , která je na počátku umístěna v blízkosti třech startovacích bodů, přičemž dvou z nich se přímo dotýká. Kouli začneme „valit“ tak, aby se vždy dotýkala alespoň jednoho bodu. Pokud se koule při svém postupu dotkne nějakého dalšího bodu, je tento přidán k stávajícím bodům, jež tvoří základ pro interpolovaný trojúhelníkový mesh (Bernardini ... [et al.], 1999).

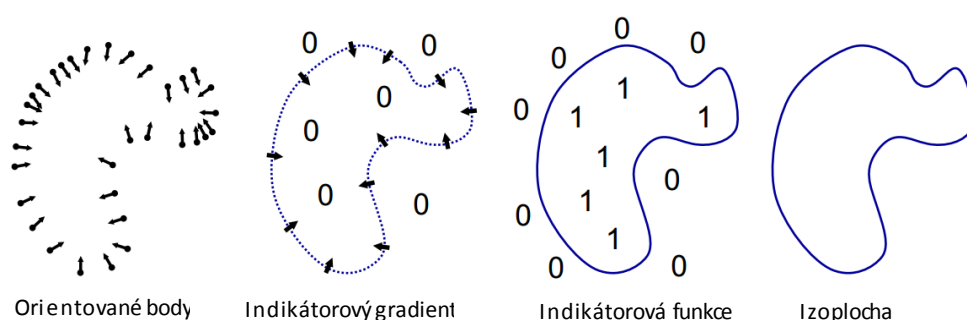


Obr. 7 Průběh algoritmu BPA v rovině (zdroj: převzato z Bernardini ... [et al.], 1999, s. 351)

Na obr. 7 je vidět koule rotující okolo bodů (a). V případě, že je mezera mezi body větší než průměr koule, nepřidají se hrany (b). Vpravo (c) vidíme situaci v místě s křivostí větší než $1/\rho$, kde jsou některé vzorky vynechány (Bernardini ... [et al.], 1999).

2.9.E. Poissonova rekonstrukce povrchu

Spolupráce univerzity v Baltimoru (USA) a společnosti Microsoft dala vzniknout Poissonovu přístupu k rekonstrukci povrchu, který na obecně přijatých referenčních datech dosáhl lepších výsledků, než ostatní algoritmy. Obecně je založen na řešení Poissonovy rovnice. Formulace řešení jako Poissonova problému zajišťuje globální pohled na rekonstrukci a tím se podstatně liší od algoritmů, které si dataset dělí na podoblasti (Kazhdan; Bolitho; Hoppe, 2006).



Obr. 8 Poissonova rekonstrukce povrchu (zdroj: převzato z Kazhdan; Bolitho; Hoppe, 2006)

Do algoritmu vstupuje dataset bodů a cílem je vygenerování vodotěsného, triangulovaného povrchu, jak ilustruje obr 8. Parametr určující úroveň detailu je hloubka octree. Vytvořený oktantový strom ve svých větvích uchovává informace o rodičích, potomcích a o vzorcích uvnitř (Zhou ... [et al.], 2011). Algoritmus na octree vypočte vektorové pole a hledá gradient, který nejlépe aproximuje bodové vektorové pole. Gradient indikátorové funkce má nulovou hodnotu téměř všude, až na místa v blízkosti bodů, kde má hodnotu normály. Výpočet indikátorové funkce se provede inverzí operátoru gradientu, jež vede k řešení pomocí Poissonovy rovnice. Indikátorová funkce nabývá konstantní hodnoty 1 v oblasti uvnitř tělesa a vně je nulová. Nakonec je potřeba vybrat izohodnotu indikátorové funkce, jež nejlépe aproximuje polohu vstupních bodů. Izoplocha se pak extrahuje v místech se stejnou izohodnotou (Kazhdan; Bolitho; Hoppe, 2006).



Obr. 9 Ukázka rekonstrukce hlavy Davida (zdroj: převzato z Kazhdan; Bolitho; Hoppe, 2006)

Výhoda implementace Poissonova problému spočívá v robustní aproximaci nepravidelně rozmístěného bodového pole. Při modelování stejně detailních modelů vyžaduje nižší paměťové nároky než ostatní metody. Algoritmus se lépe vypořádá i s daty, jež obsahují šum. Na obrázku 9 je ukázka povrchu vytvořeného touto metodou na bodovém mračnu sochy Davida od Michelangela s octree hloubkou 11.

2.10 Klasifikace dat leteckého skenování

Problematikou filtrování lidarových dat se zabývalo již hodně autorů. Pfeifer (2008) rozděluje metody do 5 kategorií: jednoduché, morfologické, progresivní, přízemní a segmentační.

2.10.A. Přehled filtrů

Jednoduché filtry pracují na principu rozdělení dat do pravidelné mřížky a v těchto buňkách vyberou vždy bod s nejmenší elevací. Tyto body tvoří základ DMT (Pfeifer, 2008).

Morfologický filtr představený Vosselmanem vychází z metod matematické morfologie. Body kontroluje podmínkou, že čím menší je jejich vzdálenost promítnutá do roviny, tím menší výškový rozdíl mezi nimi musí být. Může také kontrolovat maximální svahový úhel. Z této formy vychází další nadstavbové metody (Pfeifer, 2008).

Progresivní filtr uvedl Axelsson, když rozdělil dataset mřížkou, z níž vybíral nejnižší body jako základní body pro následnou triangulaci povrchu. Nad tímto základním povrchem se testuje zbylá většina bodů a zjišťují se hodnoty vzdálenosti k nejbližšímu trojúhelníku a hodnoty úhlů vedoucí k uzlům. Pokud tyto hodnoty spadají do určené meze, body jsou přidány ke stávajícímu povrchu a znovu se trianguluje zpřesněný povrch (Pfeifer, 2008).

Přízemní filtry pracují na opačné tezi, když celý soubor bodů označí jako terénní a mezi těmito body interpolují imaginární povrch. V několika iteracích jsou pak body ohodnoceny váhovou funkcí podle toho, zda se nacházejí nad nebo pod interpolovaným povrchem

a podle toho, v jaké jsou vzdálenosti. Body s velkou kladnou odchylkou jsou z terénní třídy eliminovány (Kraus; Pfeifer, 1998).

Segmentační filtry analyzují body skrze segmenty, které vytváří lokální růstovou funkci. Takto se agregují body v homogenních oblastech, jako jsou např. budovy. Poté se zkoumá „průchodnost“ takto rozčleněného systému a vyřazují se segmenty, jež nepatří do terénu. Tato metoda je účinná v oblastech s velkou zástavbou (Pfeifer, 2008).

2.10.B. Porovnání práce filtrů

Vzhledem k typu terénu v okolí Pravčické brány nelze očekávat ideální výsledky od náhodně vybraného algoritmu. Důkladné testování všech možných typů filtrů však přesahuje rámec zadání. Z tohoto důvodu jsem se zaměřil na již provedené testy, které jednotlivé filtrační postupy porovnávají. Jako první se tomuto tématu věnovali Sithole a Vosselman (2004), kteří experimentálně srovnávají filtrační algoritmy osmi vědeckých skupin. Jejich práci se později inspirovala čtveřice autorů pod vedením Haiyanga (2010) z čínské hornické univerzity. Tato skupina porovnávala filtry na referenčním území těžební oblasti, která se vyznačuje strmými srázy, lomy, hustě zalesněnými svahy a několika dalšími antropogenními objekty.

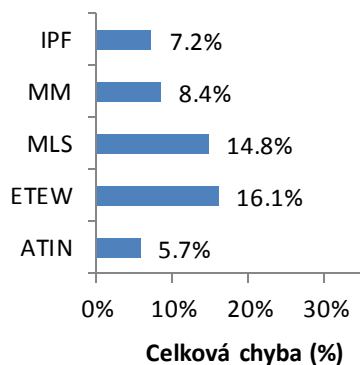
Haiyang ... [et al.] porovnává pět filtračních algoritmů:

- a) Adaptive TIN (ATIN),
- b) Elevation Threshold with Expand Window (ETEW),
- c) Maximum Local Slope (MLS),
- d) Mathematical Morphology (MM),
- e) Iterative Polynomial Fitting (IPF).

Ohodnocení kvalitativních parametrů vycházelo z efektivnosti filtrace algoritmů. Hodnotily se kategorie jako mosty, odlehlé body nebo vegetace na svazích. Odlehlé body jsou problémem pro ty algoritmy, které svůj výpočet počínají výběrem nejnižšího či nejvyššího bodu, což může být právě odlehlý bod a tím je celý proces narušen již na začátku (Sithole; Vosselman, 2004). Z kvalitativního hodnocení vyplynulo, že v odstraňování vegetace byly výsledky filtrů vyrovnané. Ve zlomovém terénu dobrých výsledků dosáhl ATIN.

Druhým důležitým kritériem pro srovnání je kvantitativní zhodnocení. Všechny filtrační algoritmy pracují tím způsobem, že klasifikují body, přičemž dochází ke klasifikačním chybám. Chyby při statistickém vyhodnocování můžeme rozdělit na dva typy. Chybu typu I označíme jako odmítnutí bodu zemského povrchu a chyba typu II znamená přijetí bodu objektu jako bod zemského povrchu. Z těchto typů chyb Haiyang ... [et al.] sestavil celkovou chybu, zobrazenou na grafu 1. Nejnižších hodnot chyb dosáhl filtr Adaptive TIN a naopak jako nejhorším byl v tomto směru ETEW (Haiyang ... [et al.], 2010).

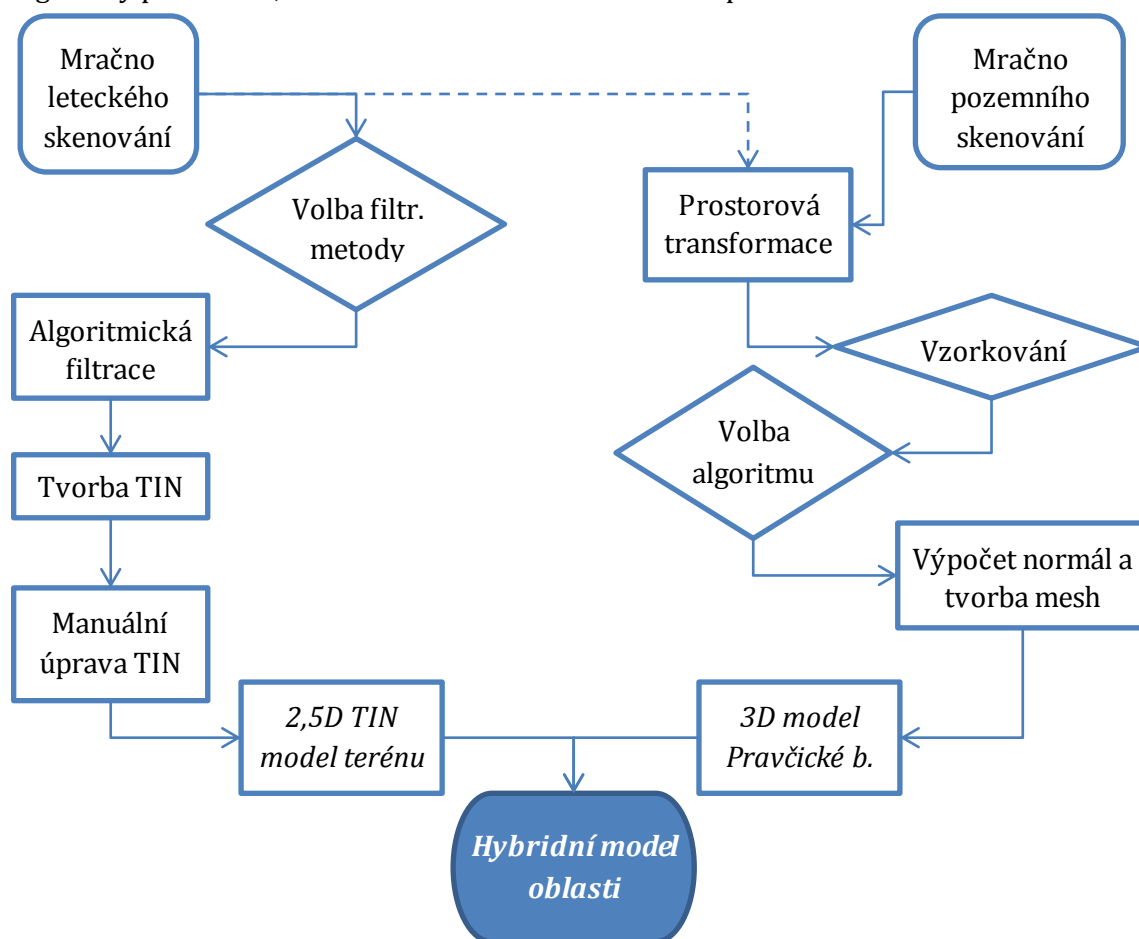
Graf 1 Celková chyba při klasifikaci (zdroj: převzato z Haiyang ... [et al.], 2010)



KAPITOLA 3

Metodika

Na počátku samotné práce jsem si definoval proces, podle kterého budu při tvorbě modelů postupovat. Vstupní data a na nich provedené dílčí úkoly vedou až ke konečnému výsledku, jak ukazují ve workflow na obr. 10. V rámci procesu bude nutné vybrat vhodné algoritmy pro filtraci, vzorkování mračen a rekonstrukci povrchu.



Obr. 10 Postup tvorby modelů (zdroj: vlastní tvorba)

3.1 Softwarové vybavení

Při práci jsem byl částečně limitován konfigurací hardware. Můj osobní počítač není dostatečně výkonný a chybějící grafický akcelérátor znemožňuje vizualizaci v ArcScene.

Složité procesy proto byly zpracovány na fakultním PC, kde je k dispozici čtyř-jádrový procesor s operační pamětí 4 GB. V případě programu MeshLab se jako hlavní faktor problémů ukázal být operační systém MS Windows, pod kterým program nezvládal náročné výpočty. Zkušenosti ostatních uživatelů naznačovaly, že větší stability by se dosáhlo použitím systému Linux nebo Mac OS, které jsem však neměl k dispozici.

3.1.A. MS Excel a Access

Při zpracovávání datových souborů budu využívat databázových programů z balíku MS Office, a to především Excel a Access. Excel je jednoduchý nástroj pro zpracování dat se základními databázovými funkcemi, ale je omezen počtem řádků. Pro větší datové soubory proto použiji Access. Konkrétně budu tyto programy využívat pro translace datasetu podél souřadných os. Důvody translace jsou uvedeny níže.

3.1.B. ArcGIS

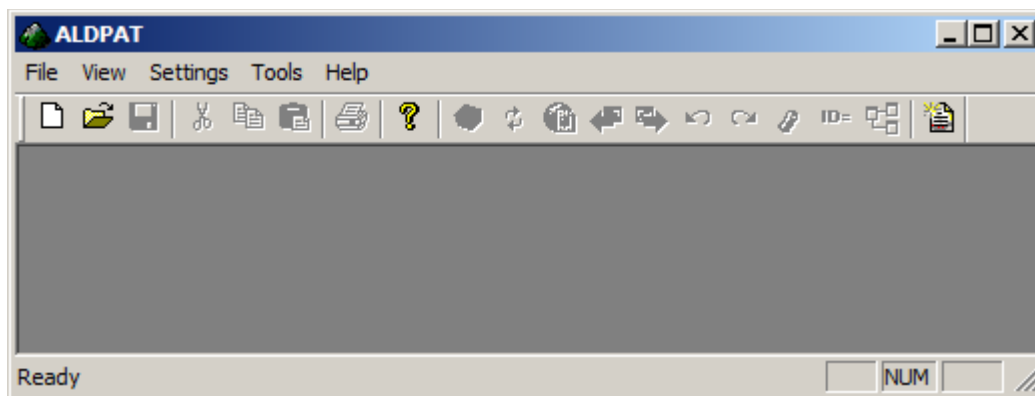
Hlavním softwarovým balíkem, do kterého integruji konečný model, je ArcGIS s aktivovanou extenzí 3D Analyst, jež poskytuje nástroje pro práci v 3D. Tento systém je standardem GIS aplikací na naší fakultě a poskytuje dobré možnosti vizualizace. V rámci tohoto systému jsou dvě hlavní aplikace, a to hlavně ArcMap pro práci v rovině a tvorbu map a ArcScene pro jejich 3D vizualizaci. ArcGIS poskytuje velké množství funkcí pro analýzu a tvorbu povrchu. V této práci využiji ArcGIS hlavně pro tvorbu TIN a vizualizaci modelů.

3.1.C. ALDPAT

Úřad NOAA s přispěním univerzity na Floridě (USA) vyvinul software ALDPAT. Název tvoří počáteční písmena anglického názvu Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tool, což můžeme přeložit jako „nástroj pro zpracování a analýzu lidarových dat“. Program poskytuje možnost automatické filtrace lidarových dat a jejich následnou klasifikaci na terénní a mimo-terénní body a obsahuje i další pomocné nástroje (NOAA, cit. 2012).

Program aktuálně existuje ve své první verzi 1.0 a je volně přístupný na webu Floridské univerzity (<http://lidar.ihrf.fiu.edu/download/softdown.aspx>), kde stačí vyplnit email a soubor s programem je možné stáhnout bez omezení. Na podpůrných webových stránkách ani v manuálu jsem nenašel informaci o podmínkách distribuce a využití. Usuzuji tak, že program pro studijní účely mohou využít. Samotný program není nutné instalovat do systému, nýbrž postačí spustit stažený soubor aldpat.exe a aplikace je ihned připravena k použití.

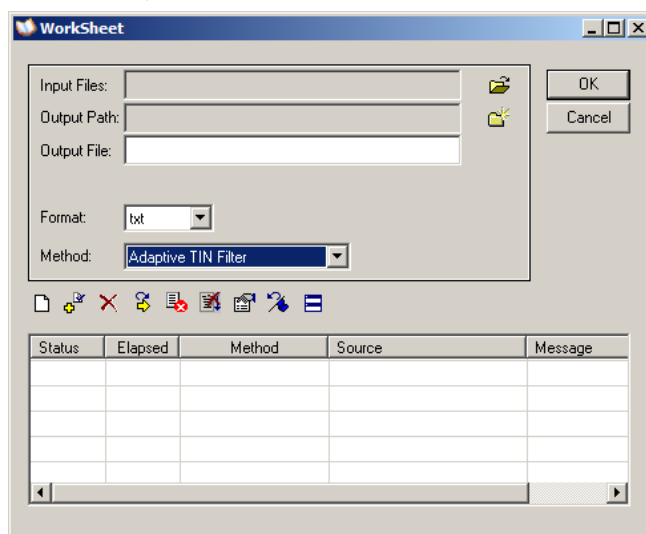
Grafické prostředí je podobné klasickému rozložení, které známe z ostatních programů pro operační systém Windows, tedy hlavní okno s jednotlivými položkami menu, pod nímž jsou ještě ikony pro vyvolání určitých funkcí, jak vidíme na obrázku 11. Podstatné funkce pro práci se ukrývají pod položkami menu Settings a Tools, neboli nastavení resp. nástroje.



Obr. 11 Základní okno programu ALDPAT (zdroj: vlastní tvorba)

Před započítím práce v ALDPAT je nutné zkontrolovat nastavení v menu Settings – Preferences, čímž se dostaneme k volbě vstupního a výstupního parametru Delimit character, tedy oddělovače dat. Nastavení oddělovače musí korespondovat s tím, jak jsou data oddělena v souboru lidarových dat.

Zvolením položky Tools –WorkSheet se zobrazí okno (na obr. 12), kde je možné zadávat jednotlivé úlohy a řadit je do fronty. To je velmi užitečné při zpracovávání velkých objemů dat. Na řádku Input Files se vybírá vstupní soubor, Output Path je složka, kam se uloží výsledek úkolu a Output File značí název cílového souboru. Položka Format udává vstupní souborový formát, tedy koncovku souboru.



Obr. 12 Okno ALDPAT pro volbu metody (zdroj: vlastní tvorba)

Nejpodstatnější částí je výběr metody v roletce Method. Zde uvádím seznam dostupných funkcí:

1. Rozdělení souboru na pásy,
2. Oddělení prvního a posledního odrazu,
3. Konverze elipsoidických výšek na ortometrické,
4. Výpočet okrajů pásu,
5. Sloučení okrajových souborů,

6. Vytvoření shapefile,
7. Rozdělení na dlaždice,
8. Filtrování lidarových dat,
9. Spojení dlaždic do sítě,
10. Konverze Surfer sítě do sítě ArcGIS,
11. Ostatní úlohy (Zhang; Zheng, 2007).

Důkladněji rozeberu pouze použití metod filtrace lidarových dat, jelikož právě tyto jsou pro moji práci klíčové. Výběr nejvhodnějšího filtru popisuji později. Program implementuje širokou škálu sedmi rozdílných algoritmů pro klasifikaci mračna bodů. Popořadě jsou to:

- a) Elevation Threshold with Expand Window,
- b) Progressive Morphology,
- c) 2D Morphological Filters,
- d) Maximum Local Slope,
- e) Iterative Polynomial Fitting,
- f) Polynomial Two-Surface Filter,
- g) Adaptive TIN (Zhang; Zheng, 2007).

Poté co vybereme vstupní a výstupní cestu spolu se zvolenou metodou, zařadíme událost do fronty a nastavíme parametry události. Run jobs odstartuje nastavené úlohy, status se změní z Ready na Running a zobrazuje se uplynulý čas. Done značí dokončení úlohy a v kolonce Message jsou doplňující informace o průběhu. V případě, že se zde zobrazuje Success, proběhlo vše v pořádku, v opačném případě je zde krátce vysvětlena příčina neúspěchu.

3.1.D. CloudCompare

Doménou tohoto programu, který vyvíjí Daniel Girardeau-Montaut, je analýza a registrace bodových mračen. Je volně dostupný pro nekomerční účely na webových stránkách tvůrce (<http://www.danielgm.net/cc/>). Ovládání programu je vcelku intuitivní díky ikonám s popisky. Užitečnou funkcí je „stříh“, který ořízne mračno dle polygonu načrtnutého do prostoru, dále zvládá vzorkování a ukládání do ASCII. Skvělá je však implementace ICP metody registrace mračen, kterou blíže popisuji v rešerši (Manuál CloudCompare, 2009).

3.1.E. MeshLab

Tento na pohled jednoduchý software má ve skutečnosti velké množství funkcí, filtrů a dalších pomocných nástrojů pro komplexní tvorbu povrchů mesh. Oproti předchozímu software je nutné jednotlivé funkce hledat v obsáhlém textovém menu, a proto je lepší pracovat s manuálem. Program je distribuován jako open-source, a jeho využití, byť komerční, není limitované (MeshLab manuál, 2009).

Jak MeshLab, tak i CloudCompare ukládají mesh do formátu PLY, který byl vyvinut pro ukládání dat z laserového skenování (Bourke, cit. 2012).

Při načítání textového souboru je nutné změnit jeho koncovku z TXT na ASC. Soubor ASC je definován jako Autodesk ASCII Export, což je univerzální formát pro body a geometrické tvary používané v inženýrských a GIS aplikacích (Fileinfo.com, cit. 2012).

3.2 Výběr aplikovaných algoritmů

3.2.A. Klasifikace lidarových dat

Výběr vhodného algoritmu pro filtraci mračna z leteckého skenování jsem provedl na základě literatury, kde je experimentálně porovnáno několik různých algoritmů.

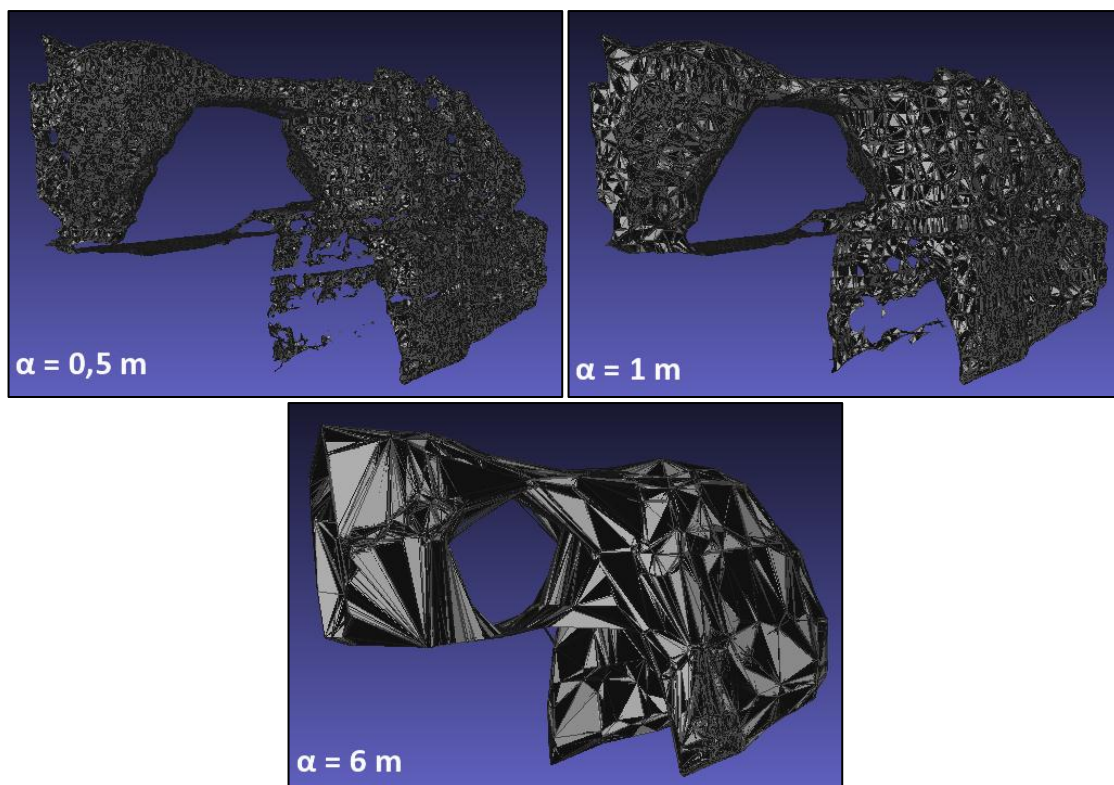
Na základě výsledků popsanych v rešerši a níže popsanych dalších okolností jsem pro účely filtrace okolí Pravčické brány zvolil filtrační algoritmus Adaptive TIN. V hodnocení chybovosti dosáhl nejnižších hodnot ze všech testovaných filtrů a velmi dobře si vedl v situacích, které jsou typické pro oblast Pravčické brány, což jsou zejména strmé skalní srázy a svažité terén pokrytý vegetací. Výhodou je také fakt, že ATIN jako jediný neodfiltroval objekt mostu v testovaném datasetu (zdroj: Haiyang ... [et al.], 2010). Co by jinde byla nevýhoda, je zde až téměř žádoucí, vzhledem k tomu, že oblouk Pravčické brány se svým tvarem mostu velmi podobá. Ve výsledku by tak měl být skalní oblouk zachován, i když bude v konečném výsledku nahrazen 3D modelem z pozemního laserového skenování. K velmi podobnému hodnocení tohoto algoritmu dospěli také Abdulah, Rahman a Vojinovic (2009) a dokonce ho označili za úplně nejlepší z testovaných. Tento tým také vypočítal menší výsledné odchylky oproti ostatním algoritmům a ocenil velmi kvalitní filtrování svahů pokrytých vegetací. Zmiňuje se i o neschopnosti odstranění mostů. Konečně, tento filtrační postup byl také implementován v komerčním software TerraScan pro zpracování lidarových dat, což potvrzuje výše zmíněné (Zhang; Zheng, 2007).

Samotnou aplikaci filtru Adaptive TIN zajistím díky software ALDPAT.

3.2.B. Rekonstrukce povrchu

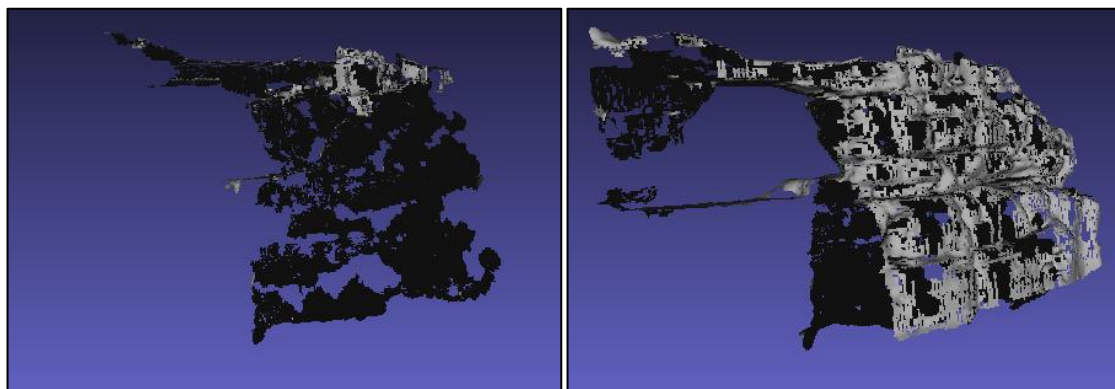
Algoritmy, jež rekonstruuji povrch, jsou založeny na různých přístupech a existuje jich poměrně mnoho. Jejich podstatu podrobněji shrnuji v úvodu do problematiky. Právě popsané algoritmy se staly předmětem mého testu v software MeshLab. Níže popisuji jejich kvalitu při práci nad vzorkovaným bodovým mračnem P. brány.

Při generování α -tvaru algoritmus dobře odhadnul tvar povrchu, ale pro zachování detailu bylo nutné snížit rádius α , což mělo za následek vytvoření obrovského počtu trojúhelníků. V povrchu bylo také poměrně hodně děr, protože algoritmus je citlivý na nepravdivé rozmístění bodů, zvláště na jihozápadní stěně brány. Příklady mesh pro různé α jsou na obr. 13.



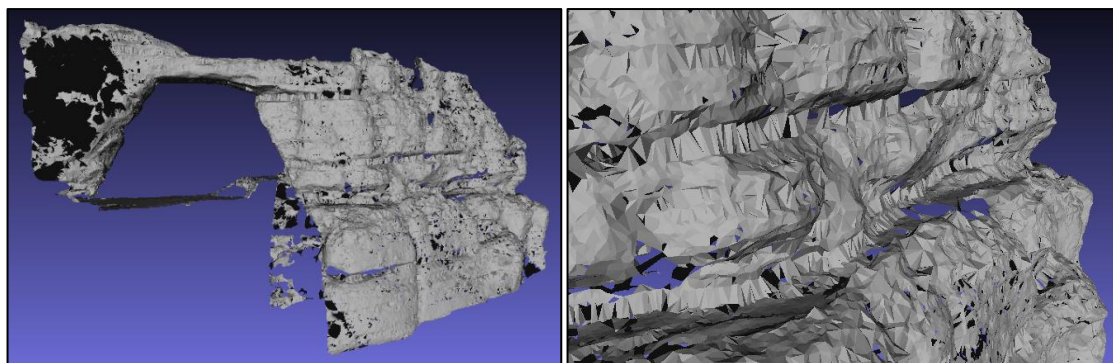
Obr. 13 α -tvar pro různé hodnoty α (zdroj: vlastní tvorba)

Algoritmus pochodujících krychlí poměrně dobře aproximoval povrch v určitých místech. Jeho nevýhodou však je fakt, že pracuje lokálně a z globálního hlediska nepodává kompaktní výsledek. Z toho pramení citlivost na nerovnoměrné rozložení bodů. Výsledky tedy nebyly příliš uspokojivé, jak je vidět na obrázku 14, kde jsou dva různě parametrizované výstupy algoritmu.



Obr. 14 Výsledek dvou parametrizací *Marching cube* algoritmu (zdroj: vlastní tvorba)

Inkrementální algoritmus Ball Pivoting valí koule od počátečních tří vzorků a další body do sítě vybírá při dotyku. U záhybů s velkou křivostí vynechává podstatné elementy a je citlivá na rozložení bodů, přičemž ty odlehle nezahrne do stavby sítě a vzniká tak množství děr a nepřesností, jako na obr. 15.



Obr. 15 Výsledek práce algoritmu Ball Pivoting (zdroj: vlastní tvorba)

Nejlépších výsledků jsem dosáhl s Poissonovou rekonstrukcí povrchu, jež vytváří uzavřený model a přesně kopíruje reálný tvar. Podmínka vodotěsnosti zaručuje povrch bez děr. Tento globální přístup pracuje v hloubce oktantového stromu, a proto je odolný vůči různé hustotě bodů v mračnu. Oktantový strom si lze představit jako počáteční krychli dělenou na 8 krychlí, které se dále dělí až do zadané hloubky (Chalupecký, 2005). Tento algoritmus jsem vybral pro tvorbu finálního modelu. Z toho důvodu jsou ukázky umístěné v praktické části na obr. 41.

3.2.C. Vzorkovací metoda

Vzorkovací metodu jsem vybral čistě na základě informací získaných při rešerši literatury. Na bodové mračno by nebylo vhodné aplikovat jakékoliv metody, které vytvářejí pravidelně rozmístěnou síť, protože by tím nutně došlo k interpolaci a změně posunu bodů. Model by však měl vycházet právě ze zaměřených bodů. Z toho důvodu pro zmenšení hustoty bodů použiji Poissonovo diskové vzorkování, které neinterpoluje nové body, ale zároveň zachovává původní rozmístění.

3.3 Translace bodových souborů

Vzhledem k definici souřadného systému WGS 84 UTM dochází na území ČR k tomu, že polohové souřadnice nabývají hodnot v řádu statisíců až milionů metrů, což způsobuje chybu v podobě ztráty desetinné přesnosti v programech CloudCompare a MeshLab. Jejich dokumentace se o tomto problému nezmiňují a patrně k tomu ani nemají důvod, protože se používají hlavně pro modelaci malých objektů, kde se souřadnice nepohybují ve velkých hodnotách a nedochází k nepřesnostem. Konkrétně dochází k tomu, že při zpracovávání čísel vysokých hodnot jsou tyto hodnoty zaokrouhlovány a ztrácí se důležitá přesnost. Provedl jsem test, abych zjistil, do jaké míry ovlivňuje velikost hodnoty její přesnost při zpracování a uložení ve zmiňovaném software. Testování bylo provedeno následujícím způsobem. Vytvořil jsem testovací datasety náhodných souřadnic (x, y, z) na postupných řádových velikostech, od jednotek po miliony, s přesností na 6 desetinných míst. Tyto bodové vrstvy jsem následně načtl do programů a ihned přeuložil. Následně jsem

porovnal původní hodnoty s těmi po procesu uložení a na základě těchto rozdílů jsem odvodil tabulku ztrát přesnosti (viz tab. 2).

Tab. 2 Zachování přesnosti při zpracovávání mračen (zdroj: vlastní tvorba)

Řád vstupních hodnot (m)	MeshLab (výstupní přesnost)	CloudCompare (výstupní přesnost)
10^2	1 mm	0,1 mm
10^3	1 cm	1 mm
10^4	1 dm	1 cm
10^5	1 m	1 dm
10^6	10 m	1 m

Z tabulky 2 vyplývá, že při zvětšování číselných řádů se snižuje zachování přesnosti za desetinnou čárkou. Program MeshLab dokáže zpracovat číslo o velikosti 6 bytů, tedy řadu 6 cifer s plovoucí desetinnou čárkou. CloudCompare je v tomto ohledu o řád lepší, protože zvládne zachovat hodnoty o jednu cifru větší. Uvedené omezení tak značně ovlivňuje data, která se nacházejí velmi daleko od počátku souřadné soustavy vedené v metrech. To představuje problém u rovinného systému WGS 84. Pásky jednotlivých válcových zobrazení jsou protáhlé v poledníkovém směru, souřadnice y dosahují na území ČR hodnot v řádu pěti milionů. Souřadnice ve směru x jsou o řád menší.

Z výše uvedených důvodů v několika případech v praktické části provádím translaci datových souborů. Tato translace probíhá v rovině a týká se pouze posunu ve směru souřadné osy x a y. Výškovou souřadnici nebylo potřeba posunovat, jelikož ta se vždy nacházela v řádu stovek. Právě přesun do řádu stovek zajistí potřebnou přesnost v rámci milimetrů v obou programech. Větší precizností se nemá cenu zabývat, jelikož i reálná přesnost měřicího přístroje Cyrax 2500, kterým byla pořízena data, se pohybuje v řádu milimetrů (Křemen, 2004).

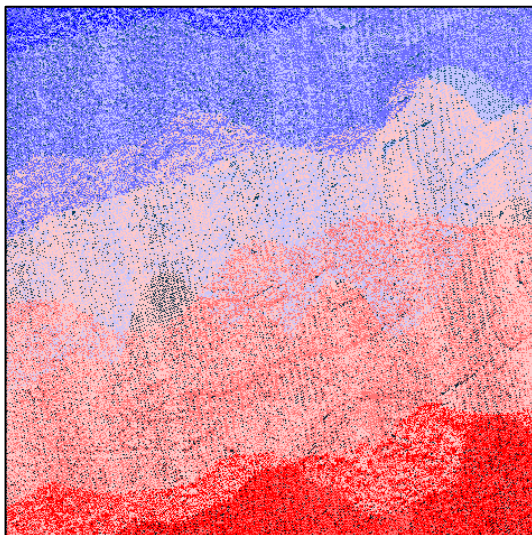
KAPITOLA 4

Data

Pro účely této bakalářské práce byly Správou Národního parku České Švýcarsko (SNPČS) poskytnuty dva datové soubory obsahující body zaměřené metodou laserového skenování. Oba tyto zdrojové soubory jsou přiloženy na datovém médiu ve složce *Zdrojova_data*.

4.1 Bodové mračno z leteckého skenování

Prvním datovým souborem (*PB_teren.txt*) je bodová síť širšího okolí Pravčické brány, která byla nasnímána pomocí leteckého laserového skeneru. Textový ASCII soubor obsahuje přesně 1 333 971 řádků, kde každý řádek obsahuje informaci o jednotlivém bodě reliéfu. Postupně jsou to polohové souřadnice X a Y, výšková souřadnice Z, zřejmě hodnota odrazivosti (to však odhaduji – dokumentace, která by to specifikovala, mi není dostupná) a přesný časový údaj o zaměření. Zobrazení časové hodnoty jako atributu ukazuje obr. 16, na němž je vidět, že území je skenované na několika překrývajících se pásích.



Obr. 16 Časový atribut ve škále modrá – červená (zdroj: vlastní tvorba)

Bodové pole je již zorientované do souřadného systému WGS 84 v zobrazení UTM: jednotkou jsou metry a hodnoty jsou dostupné s přesností na centimetr. Z neznámých důvodů jsou vždy hodnoty souřadnice X zvětšené o hodnotu 3 000 000, s čímž je nutné se

při dalším zpracování vypořádat. Pro lepší představu uvádím ukázkou začátku souboru na obr. 17.

1	3449452.00	5637468.37	440.21	25	312467.060
2	3449451.86	5637468.54	440.22	25	312467.062
3	3449451.74	5637468.47	437.05	65	312467.065
4	3449451.60	5637468.63	437.05	79	312467.066
5	3449451.42	5637468.77	437.05	91	312467.068

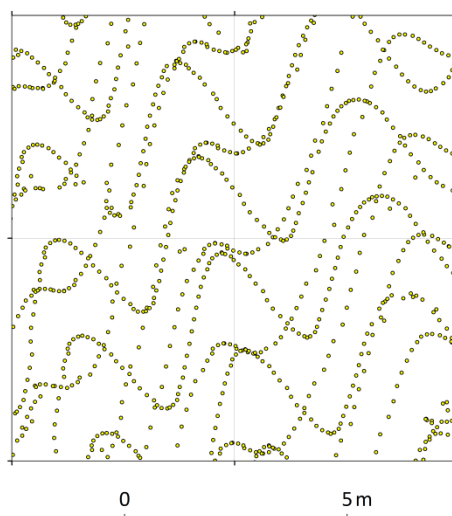
Obr. 17 Datový soubor bodové sítě okolí P. brány (zdroj: vlastní tvorba)

Pomocí databázové aplikace MS Access jsem provedl základní analýzu rozsahu souřadnic a zjistil následující základní popisnou charakteristiku, shrnutou v tabulce 3. Maximální a minimální hodnoty souřadnic X a Y mají rozdíl 400m. Jedná o čtvercové území, což dokládá náhled na body umístěné do souřadné soustavy XY (viz obr. 16). Území zabírá plochu 16 ha a obsahuje 1 333 971 bodů, což znamená hustotu pokrytí 8,34 bodů/m² nebo také průměrnou vzdálenost 0,35 m mezi body promítnutými do roviny.

Tab. 3 Základní statistika bodového mračka okolí Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

souřadnice	minimální hodnota (m)	maximální hodnota (m)	Δ (m)
X	3 449 220,00	3 449 620,00	400,00
Y	5 637 070,00	5 637 470,00	400,00
Z	317,28	521,83	204,55

Popisná charakteristika celku by však mohla zkreslit poněkud odlišnou realitu. Ve skutečnosti je terén skenován v několika pásmech, které se částečně překrývají a skenovací řádka má podobu vlny, z čehož pramení, že body jsou v lokální úrovni rozloženy nepravidelně, jak lze pozorovat na obr. 18, kde je výřez oblasti o velikosti 10 × 10 m, který dobře charakterizuje celý soubor dat.



Obr. 18 Detailní výřez oblasti 10 × 10 m (zdroj: vlastní tvorba)

4.2 Bodové mračno z pozemního skenování

Druhý textový soubor (*Pravcickabrana.txt*) obsahuje mračno bodů, které vzniklo jako produkt pozemního laserového skenování skalního útvaru Pravčické brány. Průběh zaměření cituji z technické dokumentace: „Měření v terénu bylo provedeno laserovým skenerem Cyrax 2500 s připojením do místní souřadné soustavy pomocí dočasně signalizovaných vlčovicových bodů. Souřadnice vlčovicových bodů byly určeny polární metodou přístrojem Leica TCA 2002 z volného stanoviště“ (e-mail O. Holešinského, cit. 2012).

Další okolnosti uvádí správce GIS z SNPČS Holešinský (e-mail O. Holešinského, cit. 2012): „Pozemní skenování bylo z důvodu nepřístupnosti terénu provedeno právě za účelem zjištění tvaru a velikosti PB. Zakázka byla bohužel provedena velice narychlo na konci roku 2002“.

Zaměřeno bylo celkem 1 706 259 bodů. Pro každý bod jsou známy prostorové souřadnice X, Y, Z a jsou vedeny v modelovém souřadném systému s jednotkou metr. Orientace tohoto datového souboru do souřadného systému WGS 84 UTM je pro další práci nezbytná a budu se jí zabývat později. Data jsou zdánlivě vedená s přesností na mikrometr, ale tento počet desetinných míst je způsobem transformací, která musela být provedena při registraci zaměření z více poloh do jednoho mračna. Reálná přesnost přístroje se pohybovala v řádu milimetrů (Křemen, 2004). Prvních 5 řádků z datového souboru je možné zhlédnout na obr. 19.

1	9840.416646	9307.442178	249.709339
2	9835.393822	9312.071187	249.761342
3	9835.434871	9312.032447	249.761504
4	9841.162888	9312.397534	249.588202
5	9838.375151	9314.473772	249.74397

Obr. 19 Datový soubor bodů Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

Tab. 4 Extrémy hodnot v mračnu Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

souřadnice	minimální hodnota (m)	maximální hodnota (m)	Δ (m)
X	9 821,181	9 878,425	57,244
Y	9 298,681	9 372,783	74,102
Z	224,515	273,331	48,816

Výše uvádím okrajové hodnoty souřadnic v bodovém mračnu Pravčické brány, zaokrouhlenou na milimetry (tab. 4). Delta v posledním sloupci udává rozměry ohraničujícího kvádru (bounding box).

KAPITOLA 5

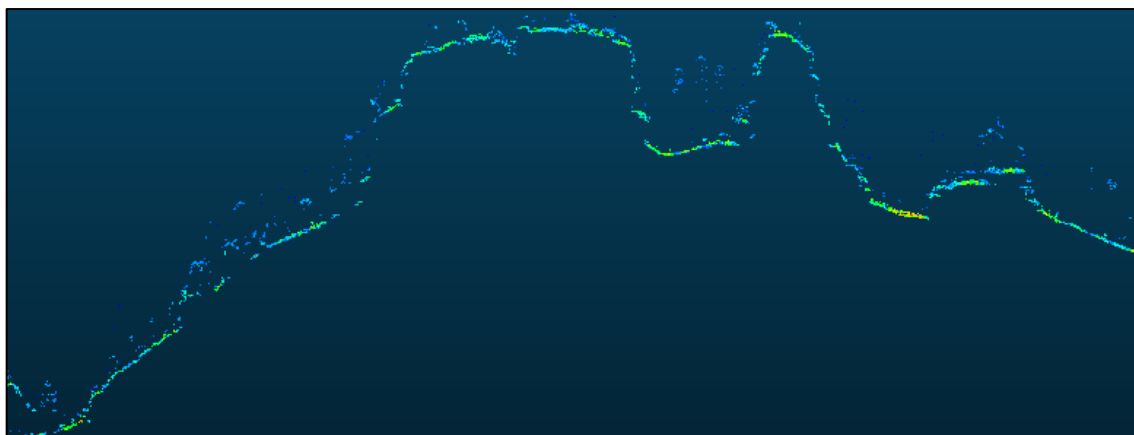
Praktická část

5.1 2,5D model terénu

V předchozí kapitole jsem představil zdrojová data z leteckého laserového skenování. Toto velmi obsáhlé mračno bodů bude sloužit jako základ pro bodovou síť 2,5D modelu okolí Pravčické brány. Body zachycují veškeré objekty, které se v době skenování vyskytovaly na zemském povrchu, ať už se jedná o nízkou vegetaci, vysoké stromy, různorodé skalní útvary nebo také objekty vytvořené antropogenní činností, jejímž příkladem může být výletní zámeček Sokolí hnízdo, který vyrostl v roce 1881 v těsné blízkosti skalního masivu Pravčické brány (pbrana.cz, cit. 2012).

Zaměřené mračno tedy reprezentuje model povrchu, zatímco mým cílem je zpracovat digitální model terénu, který je definován jako digitální reprezentace reliéfu zemského terénu, obsahující data a interpolační algoritmus, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů (Terminologický slovník VÚGTK, cit. 2012). K odstranění nežádoucích bodů, které nesouvisí se samotným terénem, bude nutné využít metody filtrace. Pouhá manuální selekce cca 1,3 milionu bodů (při práci ve 3D zobrazení) by byla časově velmi náročná a neefektivní. Na obr. 20 je průřez terénem v severojižním směru, kde je jasně vidět kontura terénu a roztroušený vegetační kryt. Z tohoto důvodu je lepší využít algoritmických přístupů k filtrování, které jsou implementovány v programu ALDPAT. Volbu algoritmu popisuji v metodické části.

Před aplikací filtru jsem posunul mračno ve směru osy x tak, aby se souřadnice (x) zmenšila o hodnotu 3 000 000 a korespondovala tak se souřadným systémem WGS 84 UTM. Této úpravy jsem dosáhl pomocí dotazovacích funkcí v MS Access.



Obr. 20 Průřez mračnem terénu v severojižním směru (zdroj: vlastní tvorba)

5.1.A. Proces automatické filtrace

Samotnou klasifikaci bodů provede již zmíněný program ALDPAT, ve kterém se založí nový úkol. Vstupem je textový soubor v původní podobě, tedy souřadnice oddělené mezerami, formát textový (TXT) a metoda Adaptive TIN. Takto zadanou úlohu zařadím do fronty. Dále je potřebné vyvolat okno (na obr. 21) s nastavením parametrů, podle kterých bude pracovat ATIN algoritmus.

Parameter	Value	Type
Cell Size	0.500000	Double
Z Difference	0.100000	Double
Angle Threshold	0.000000	Double
Init TriGrid Size	2	Double
Tile X Width	10	Double
Tile Y Height	10	Double
Tile Buffer	1	Double

Obr. 21 Nastavení parametrů filtru ATIN (zdroj: vlastní tvorba)

Filtrační parametry se zadávají jako datový typ double, tedy desetinné číslo. Vzhledem k tomu, že se jedná o americký software, zapisujeme desetinnou tečku. Všechny hodnoty parametrů mají jednotkový rozměr metr. Obsahují následující položky:

- Cell size*: velikost buňky sítě, na kterou se rozdělí soubor dat pro prvotní analýzu rozsáhlého objemu dat.
- Z Difference*: značí hraniční parametr a je porovnáván se vzdáleností bodu od povrchu TIN. Pokud je vypočtená hodnota nižší, nežli tento parametr, je splněna první podmínka zařazení do datasetu terénních bodů.

- c) *Angle Threshold*: hraniční hodnota úhlu. Je srovnávána s maximem ze tří úhlů, které svírá trojúhelníková ploška sítě TIN a spojnice bodu s vrcholy trojúhelníka. Pokud platí i tato druhá podmínka, bod je klasifikován jako terénní. Implicitně je hodnota nastavena na 0, což znamená, že podmínka se nepoužije.
- d) *Init TriGrid Size*: znamená velikost buňky inicializační sítě, v jejíž každé buňce se hledají tzv. „seed points“, tedy body s minimální hodnotou výškové souřadnice, které jsou prvními terénními body a jsou základem pro TIN.
- e) *Tile X Width*: šířka dlaždice pro aplikaci filtru ATIN. Delaunayova triangulace je výpočetně náročná a z toho důvodu je bodové pole rozděleno na obdélníkové dlaždice.
- f) *Tile Y Height*: výška obdélníkové dlaždice (viz bod e) výše).
- g) *Tile Buffer*: velikost bufferu obdélníkové dlaždice. Obalová zóna je vytvořena kvůli zajištění konzistence výsledků na okrajích sousedních dlaždic (Zhang; Zheng, 2007).

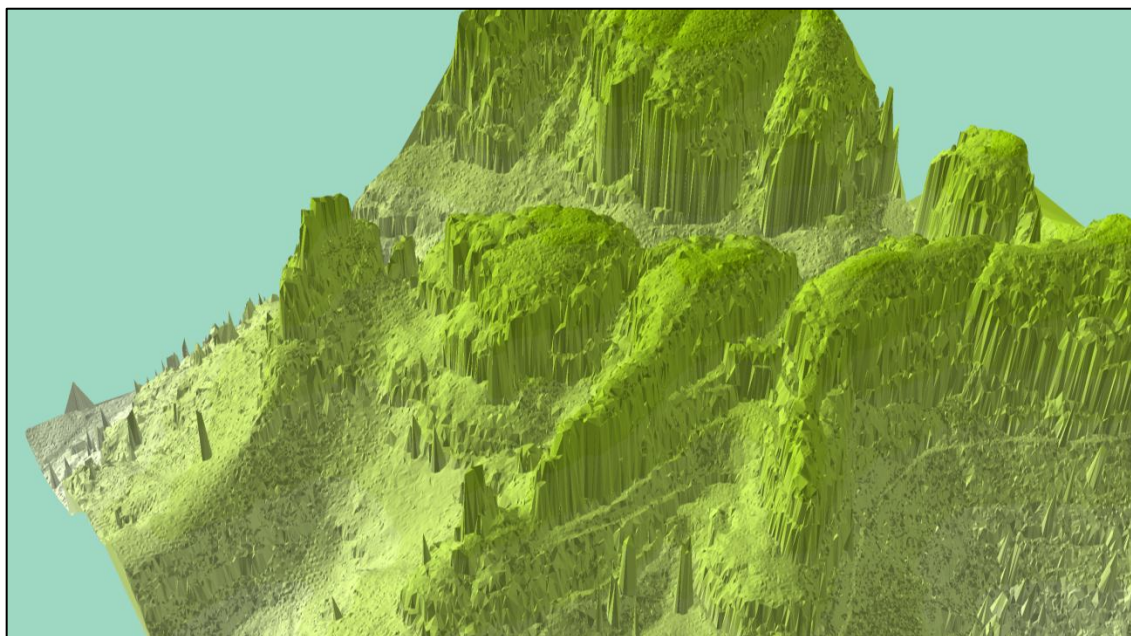
Optimální nastavení parametrů pro dataset lidarových dat okolí Pravčické brány bylo předmětem testování metodou „pokus a omyl“. Velikost buňky, kde se hledají počátky TINu, určuje konečné rozlišení detailů. Příliš velká buňka zajistí hladší výsledek, ve kterém však chybí důležité detaily a např. skalní srázy jsou v tomto nastavení velmi vyhlazené. Velmi malá velikost buňky naopak zachová kvalitní míru detailnosti, ale filtr v konečném výsledku zanechá přílišné množství vegetace, kterou by bylo náročné odstraňovat při pozdější manuální editaci. Testoval jsem různé nastavení parametrů a pro tyto kombinace jsem nechal zpracovat výsledné odfiltrované datasety. Ty jsem importoval do prostředí ArcGIS a nechal jsem vytvořit pro každý vyfiltrovaný bodový soubor nepravidelnou trojúhelníkovou síť TIN. Proces tvorby TIN popisují níže. Těchto několik výsledků jsem poté vizuálně porovnával v aplikaci ArcScene a jako konečnou variantu jsem vybral sadu parametrů shrnutou v tabulce 5.

Tab. 5 Finální volba parametrů pro filtr Adaptive TIN (zdroj: vlastní tvorba)

Parametr	Hodnota (m)
Cell Size	0,5
Z Threshold	0,1
Initial Triangulation Grid Size	2,0
Tile X Length	10,0
Tile Y Length	10,0
Tile Buffer Size	1,0

Poté co program ALDPAT provede filtrační proces, do zvolené cílové složky uloží 2 soubory se stejným názvem, ale rozdílnou koncovkou. Soubor s koncovkou LOG je v podstatě textovou zprávou o průběhu procesu. Na začátku souboru jsou uloženy zvolené parametry a dále následují informace o dlaždicích a statistika popisující počáteční body,

triangulaci, klasifikované body atp. V druhém souboru TXT jsou obsažena klasifikovaná data, tedy pouze dataset terénních bodů. Tento textový soubor obsahuje souřadnice oddělené mezerou, kdy na každém řádku je trojice souřadnic (x, y, z). Z původního počtu 1 333 971 bylo 273 227 bodů klasifikováno jako body patřící zemskému povrchu, což tvoří 20,5 % originálních dat. Textový soubor je umístěn v adresáři *2.5D_model_terenu/CLOUD_after_ATIN.txt*.



Obr. 22 TIN po aplikaci automatického filtru (zdroj: vlastní tvorba)

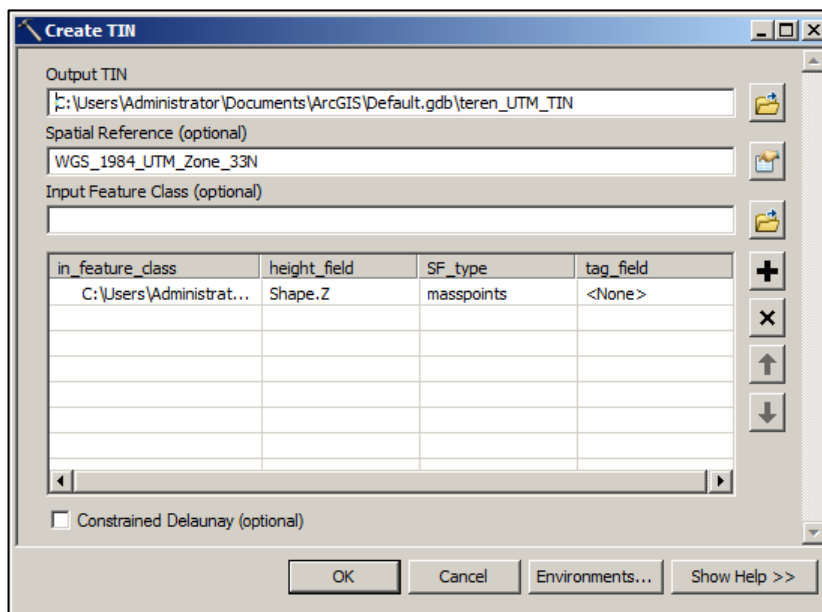
Nicméně ani v dnešní době nezajistí pokročilý automatický filtr ideální výsledek, a proto je vždy nutná manuální asistence člověka, který kvalitu výsledku zkontroluje a případně upraví. To je přesně případ této práce. Přestože je terén na první pohled poměrně dobře odfiltrován, na některých místech jsou pozůstatky vegetace, jak vidíme na obr. 22. Bude proto nezbytné tyto nedostatky odstranit.

5.1.B. Tvorba DMT v ArcMap

Po procesu automatické filtrace přichází na řadu převod bodového mračna na digitální model terénu, který vytvořím v programu ArcMap. Na počátku celé akce je důležité správně vybrat typ modelu, jež bude zemskou plochu reprezentovat. Aplikace ArcMap dovoluje pracovat se dvěma základními datovými typy: rastrovým nebo vektorovým modelem. Mračno bodů, ačkoliv odfiltrované, je tvořeno shlukem nepravidelně rozmístěných bodů, a proto je vhodné využít vektorovou reprezentaci, která tyto nepravidelnosti zachová a dovolí postavit model na přesně zaměřených terestrických bodech. Dosáhne se tak lepší aproximace terénu v místech, kde je velká členitost. Jeho nevýhodou se může zdát prvotní výpočetní náročnost, ale ta je vykompenzována objemovým nárokem, který je menší než u rastrového modelu. Rastrová reprezentace interpoluje data do pravidelné čtvercové mřížky a tím by došlo ke ztrátě původních zaměřených bodů. Je proto vhodná spíše pro rozsáhlejší územní celky, kde tolik nezáleží

na lokálních detailech. V aplikaci ArcMap je možné vytvořit vektorový datový model ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě TIN.

Aplikace ArcMap umožňuje tvorbu TIN pouze s aktivovanou extenzí 3D Analyst jež rozšiřuje nabídku analytických operací pro práci v trojrozměrném prostoru. Před započítím tvorby modelu terénu, je nutné do ArcMap importovat vyfiltrovaný dataset ve formě textového souboru. V ArcToolboxu k tomu slouží nástroj ASCII 3D to Feature Class. Jeho vstupem je jeden nebo více souborů s hodnotami souřadnic zapsanými v pořadí X, Y, Z a případně ještě čtvrtým parametrem, intenzitou odraženého laserového záření. Tento výběr provedu v kolonce pro formát, kde označím XYZ. Cílový soubor se uloží pod názvem uvedeným v Output Feature Class a to buď jako bodová vrstva v geodatabázi, nebo jako bodový shapefile. Typ výstupu musí být POINT, nikoliv MULTIPOINT, který shlukuje body podle nastavené průměrné vzdálenosti. Parametr Z factor zůstane nevyplněný nebo s číslem 1 – mění totiž měřítko vertikální souřadnice Z. Důležitým krokem je zvolit správný souřadný systém v poli Input Coordinate System. Jak již jsem zmínil, jedná se o souřadný systém WGS 84 s univerzálním transversálním Mercatorovým zobrazením. V domovském adresáři ArcMap je možné soubor se systémem rovinných souřadnic najít v podsložkách s cestou Coordinate Systems/Projected Coordinate Systems/UTM/WGS 1984/Northern Hemisphere/WGS 1984 UTM Zone 33N.prj (AcrData Praha, cit. 2012). Téměř celé území ČR a s tím i celá zkoumaná oblast se nachází na severní polokouli mezi 12. a 18. stupněm východní délky, čemuž odpovídá zobrazovací pás 33N (spatialreference.org, cit. 2012). Posledním krokem je nastavení oddělovače desetinných míst, což je v mém případě tečka, tedy DECIMAL POINT. Po potvrzení proběhne konverze ASCII dat do zvoleného formátu. Já jsem zvolil uložení do shapefile. Na přiloženém DVD je k nalezení pod názvem *SHP_CLOUD*.



Obr. 23 Dialog Create TIN (zdroj: vlastní tvorba)

Nyní je možné přistoupit k vygenerování TIN. Z balíku ArcToolbox spustím nástroj Create TIN. Objeví se dialog (obr. 23), kde se do políčka Output TIN vyplní cesta k výstupnímu modelu TIN, v poli Spatial Reference zvolím opět stejný soubor souřadného systému WGS 1984 UTM Zone 33N. Do Input Feature Class přetáhnu bodovou vrstvu. Potvrzením tohoto dialogu začne tvorba digitální podoby terénu ve formě TIN. Tento výstup je uložen ve složce *TIN_afterATIN*.

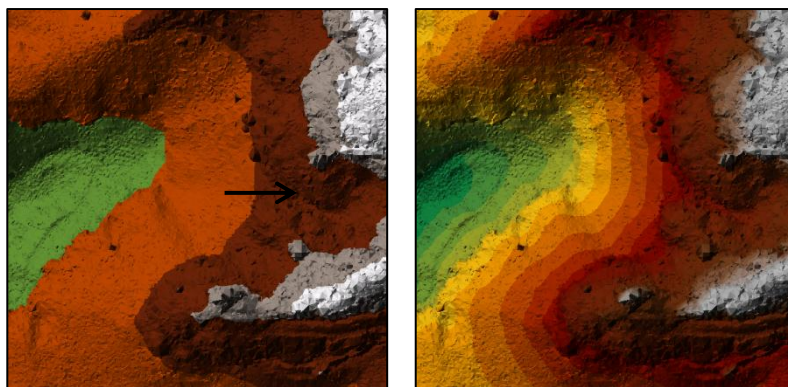
5.1.C. Dodatečná manuální filtrace

Další práce s TIN je v ArcMap uživatelsky vstřícná, jelikož aplikace obsahuje jednoduché funkce pro editaci tohoto datového modelu prostřednictvím lišty nástrojů TIN Editing. Tuto lištu zobrazíme výběrem z menu Customize – Toolbars, samotná lišta je na obrázku 24.



Obr. 24 Lišta TIN Editing v aplikaci ArcMap (zdroj: vlastní tvorba)

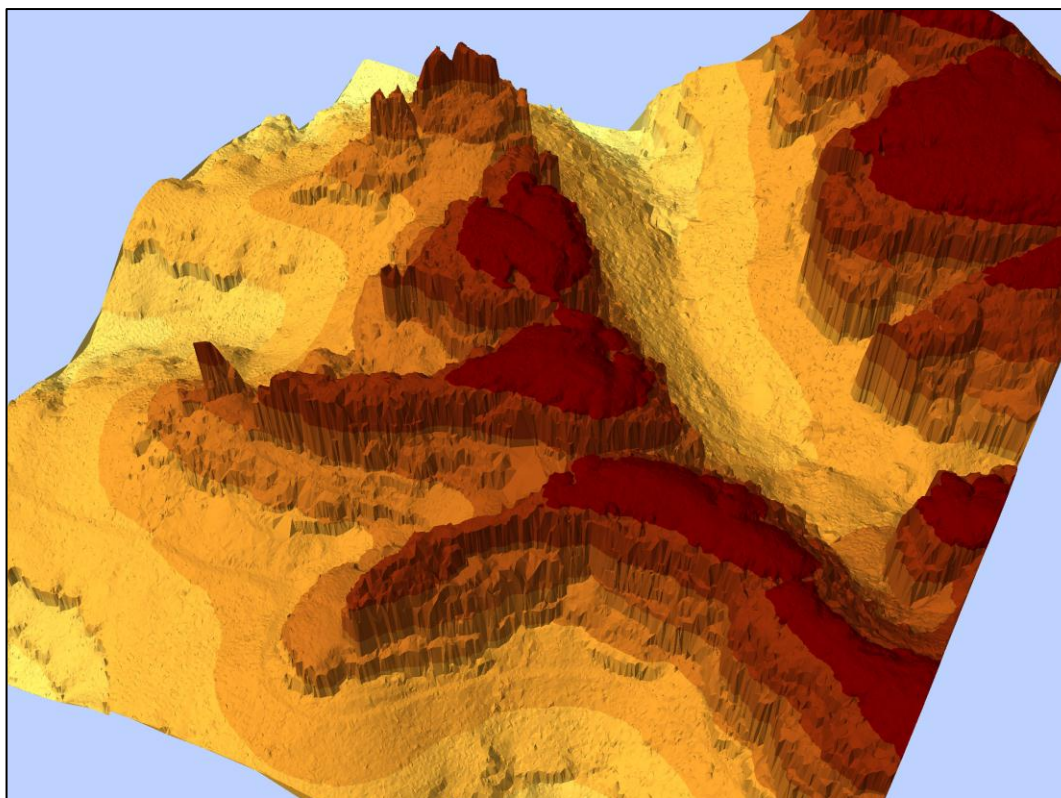
Úpravy TIN zahrnují možnost vkládat nové body (uzly) do trojúhelníkové sítě, měnit typ hran, posunovat již existující body, spojovat je novými hranami a hlavně také smazat nevyhovující body. V celém procesu filtrování lidarových dat je tato manuální editace časově nejnáročnější část, kdy je nutné vizuálně kontrolovat celý model a odstranit nedokonalosti, jež nezmizely při automatické filtraci, což mohou být zbytky objektů či vegetace. Stanovil jsem si vlastní proces takovýchto úprav v aplikaci ArcMap. Práce bude probíhat ve 2D zobrazení „shora“ v ArcMap, jelikož ArcScene 3D editaci TIN neumožňuje. Ve vlastnostech načteného modelu TIN se nastaví typ zobrazení na barevnou škálu podle hodnoty elevace. Je vhodné zvolit více intervalových tříd, do kterých se škála rozdělí, jelikož se tak lépe pozná výškový rozdíl. Níže jsou výřezy stejných oblastí, avšak v různém barevném rozlišení výšek. Na obr. 25 vlevo má jedna barva výškový interval 30 m, zatímco vpravo je to pouze 5 m. Na zobrazení s větší barevnou škálou se dají lépe rozpoznat odchylky od jinak kontinuálního povrchu a může se přistoupit k editaci. Vyberu dostatečně velké měřítko zobrazení, zvolím Start Editing TIN pro začátek módu úprav a použiji funkci Delete TIN Node (na obr. 24 modře podbarvená ikona). Pohybem kurzoru se systém automaticky přichytává na nejbližší uzel. Klikem na označený bod se uzel vymaže. Aplikace poté ihned přepočítá pozměněnou plochu a triangulací vytvoří nové trojúhelníkové plošky. Takto je možné vymazat uzly i v nakresleném polygonu, což je velmi výhodné při úpravách rozsáhlejších ploch. Vzhledem k občasnému pádu aplikace je vhodné TIN průběžně ukládat a na konci práce ukončit mód editace.



Obr. 25 Širší barevná škála usnadní ruční filtraci (zdroj: vlastní tvorba)

Při rozhodování, zda v tom určitém místě terén upravit, však není dobré spoléhat se pouze na pravděpodobnost toho, že povrch terénu na sebe bude navazovat bez jakýchkoliv zlomů či jiných rychlých změn sklonu, což je v této skalnaté oblasti obzvlášť časté. K rozhodnutí může pomoci současné porovnání s ortofotem. Získat samostatné letecké snímky není finančně jednoduchá záležitost, a proto využijí připojení k WMS (standard webové mapové služby). Veřejně dostupné WMS služby poskytuje portál České informační agentury životního prostředí (dále CENIA) nazvaný Geoportal, který podporuje zobrazení v souřadnicovém systému WGS-84 UTM-33N, takže není nutné model transformovat do jiného systému souřadnic. Nastavení WMS v ArcMap probíhá přes ArcCatalog, kde je položka GIS Servers, v níž se poklepe na Add WMS Server a do pole URL stačí vložit adresu http://geoportal.gov.cz/ArcGIS/services/CENIA/cenia_rt_ortofotomapa_aktualni/MapServer/WMSServer (v případě nefunkčnosti je nutné dohledat aktuální adresu na webu geoportal.gov.cz) a zvolit verzi 1.3.0. Po klepnutí na OK se do ArcCatalog uloží právě nastavená WMS služba. Po připojení k relaci WMS se objeví dlouhá struktura podložek, na jejímž konci je „ortofotomapa aktuální 50 cm“. Ortofoto se načte jako nová vrstva do datového rámce a přesně lícuje na model TIN. Za vizuální asistence ortogonálního leteckého snímku, jemuž je možné nastavit i průhlednost, je úprava modelu TIN o dost snazší.

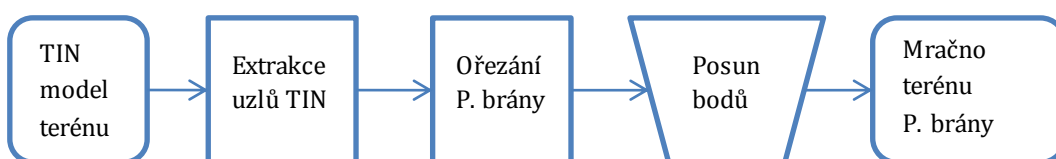
Konečná podoba úprav je tedy z určité části ovlivněná dostupnými referencemi a kvalita provedení záleží na zkušenostech uživatele a znalostech zkoumaného terénu. Finální 2,5D reprezentace terénu jsou uloženy na přiloženém datovém médiu ve složce *2.5D_model_terenu* jako *TIN_UTM_filtered*. Snímek zachycující pohled na čistou odfiltrovanou scénu z jihozápadu je na obr. 26.



Obr. 26 Pohled na odfiltrovaný TIN model terénu (zdroj: vlastní tvorba)

5.1.D. Zpětná extrakce uzlů TIN do mračna bodů

Kompletně odfiltrovaný TIN nyní převedu zpět na mračno bodů, jež později využiji při prostorové transformaci mračna z pozemního skenování. Jedním z kroků je i translace uzlů TIN z reálných souřadnic blíže k počátku souřadné soustavy. To vše proto, abych v open-source programech neztratil přesnost (viz metodická část). Obr. 27 naznačuje postup extrakce uzlů.



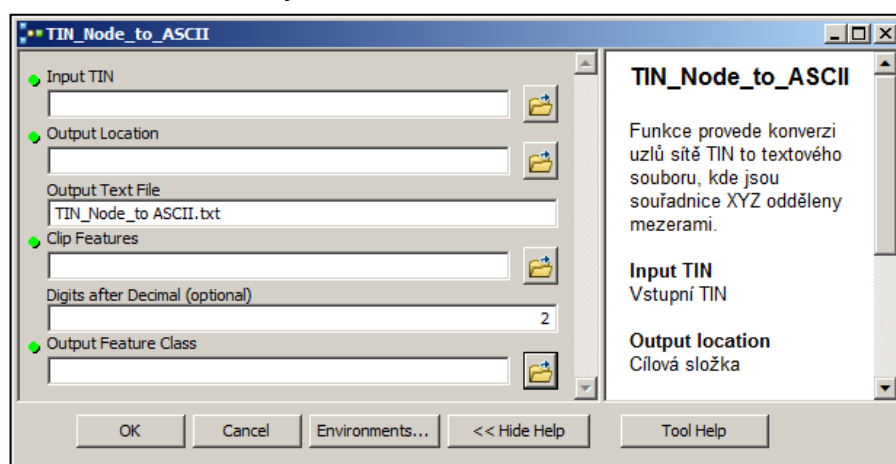
Obr. 27 Schéma přípravy dat pro geokódování (zdroj: vlastní tvorba)

Extrakci uzlů neboli základních bodů trojúhelníkové sítě, ve které je uložen model terénu, do textového souboru provedu v aplikaci ArcGIS, kde byl TIN vytvořen. Zde jsem využil možnosti nastavení vlastní funkce pomocí ModelBuilder. Navrhl jsem modelovou funkci TIN_Node_to_ASCII (přiložena na DVD jako toolbox), která se skládá z funkcí: TIN Node, Feature Class Z to ASCII a Clip. Celý proces probíhá v následujících krocích:

1. TIN Node extrahuje uzlové body sítě a uloží je do 3D bodové.
2. Bodová vrstva se následně ořízne polygonovou vrstvou CROP_BRANA, obsahující polygon, zhruba ohraničující místo, jež pokrývá mračno pozemního skenování.
3. Převod do textového souboru zajistí Feature Class Z to ASCII.

Vytvořená modelová funkce je na obr. 28. Vstupem je TIN, ořezávající polygon a cílová složka souboru spolu s požadovanou přesností v poli Digits after Decimal, jež určuje počet desetinných míst (implicitně 2 des. místa). Textový soubor se uloží pod názvem TIN_Node_to_ASCII.txt. Do uživatelem zadávaných parametrů jsem musel zahrnout i volbu uložení bodové vrstvy vytvořené v mezikroku, protože jinak program hlásí chybu.

Předchozím postupem jsem extrahoval bodovou síť do lehce zpracovatelného datového formátu a mohu přistoupit k translaci modelu. Textový soubor obsahuje cca 200 tisíc řádků. V MS Excel upravím hodnoty souřadnic (x, y) a posunu je do řádu stovek. Takto extrahovanou část terénu využiji při registraci mračna pozemního skenování (viz kap. Georeferencování mračna bodů).



Obr. 28 Parametry modelové funkce (zdroj: vlastní tvorba)

5.2 3D model Pravčické brány

Po tvorbě modelu terénu širšího okolí Pravčické brány přistoupím k rekonstrukci skalního útvaru z dostupných pozemních lidarových měření. Předchozí model vylučoval situaci, aby dvojice souřadnic (x, y) mohla mít více než jednu výškopisnou hodnotu a z toho důvodu je také tato reprezentace označována jako 2,5D. Naproti tomu pravý 3D model je vyjádřen jako funkce tří proměnných (x, y, z), závislých na parametrech u a v , které parametrizují funkce (f, g, h), jak je vidět z následujících rovnic:

$$x = f(u, v)$$

$$y = g(u, v)$$

$$z = h(u, v)$$

Je tak možné v trojrozměrném prostoru generovat libovolně orientované plošky a dvojice souřadnic (x, y) může nabývat více hodnot elevace (Bayer, 2008).

Jelikož se souřadnice v modelovém souř. systému P. brány nachází mezi hodnotami v řádu tisíců, což koresponduje se ztrátou přesnosti na centimetry, bude vhodné datový soubor upravit takovým způsobem, aby byl pokryt pouze hodnotami v řádu stovek, Pro lepší představu odkazuji na tabulku 4, kde udávám extrémy hodnot modelových souřadnic

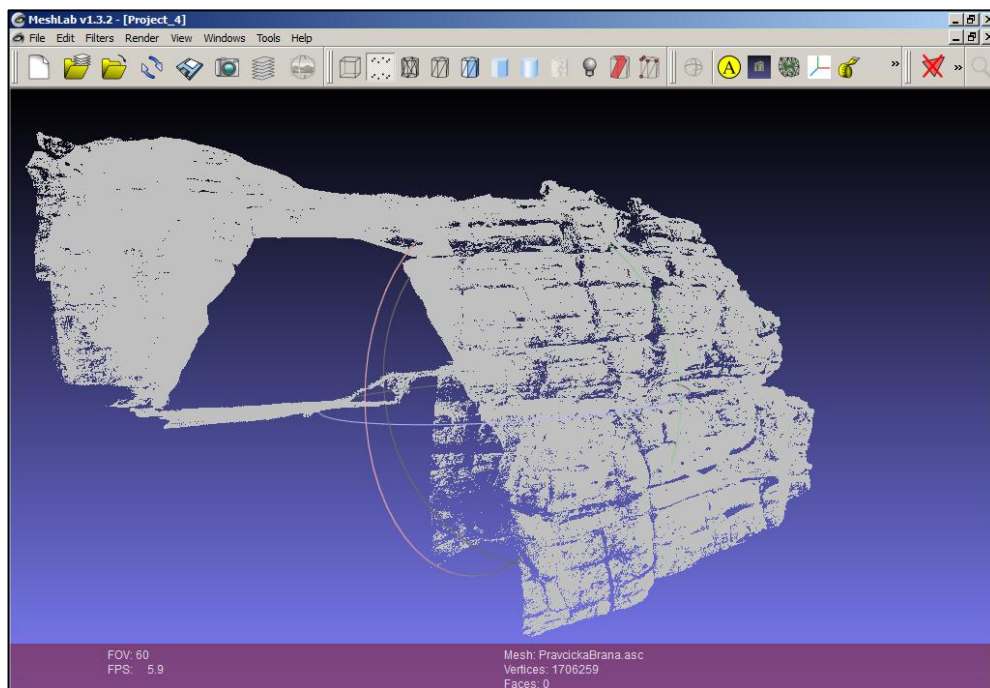
P. brány. Z ní je patrné, že x a y plovou na hodnotě 9000 a výškové hodnoty splňují řád stovek. Jednoduchou úpravou v MS Excel odečtu od polohových souřadnic číslo 9000, čímž dojde k translaci modelu podél přímky $x = y$, blíže k počátku souřadné soustavy. Nyní jsou trojice souřadnic v řádu stovek a zajistí se tak zachování požadované přesnosti při dalším zpracování. Posunutí ilustruje pohled na část dat na obr. 29.

x	y	z	translace	x'	y'	z'
9846,459961	9320,759766	265,436005	$x' = x - 9000$	846,459961	320,759766	265,436005
9865,580078	9342,419922	248,789993	$y' = y - 9000$	865,580078	342,419922	248,789993
9863,030273	9337,030273	265,320007	$z' = z$	863,030273	337,030273	265,320007
9834,389648	9310,009766	257,934998		834,389648	310,009766	257,934998
9868,419922	9331,919922	234,807999		868,419922	331,919922	234,807999
9851,959961	9322,599609	260,558990		851,959961	322,599609	260,558990
9841,469727	9309,919922	265,959015		841,469727	309,919922	265,959015

Obr. 29 Translace datasetu Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

5.2.A. Vzorkování

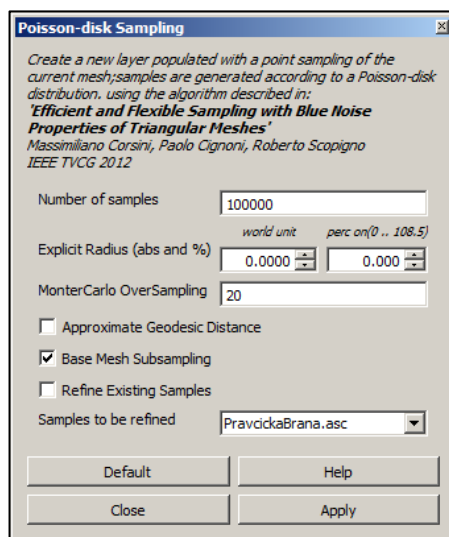
Před samotnou rekonstrukcí povrchu je také vhodné zmenšit celkový objem zdrojových dat provedením tzv. subsamplingu (vzorkování). Původní soubor totiž obsahuje 1 706 259 záznamů o velikosti 58 MB. Tento objem dat se ukázal být velmi těžko zpracovatelný na dostupném hardware. Důsledkem operace subsampling je ve své podstatě zmenšení hustoty mračna bodů. Využijí implementace vzorkovacího Poisson diskového algoritmu v programu MeshLab. Při otevírání souboru odškrtnu Grid triangulation a vyčkám na načtení dat mračna Pravčické brány. Původní obsáhlé mračno ilustruje obr. 30.



Obr. 30 Zdrojové mračno bodů Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

Funkci Poisson disk sampling najdeme v menu Filters –Sampling. Dialog pro zadání parametrů této funkce je na obr. 31. Zde vypíšu odhadovaný konečný počet bodů a proces

spustím s volbou Base Mesh Subsampling, která zaručí, že algoritmus nebude interpolovat nové body, ale použije stávající dataset. Po dokončení výpočtu se vytvoří nová vrstva, v níž je obsažena tvarově stejná bodová síť, avšak menší hustoty. Navrhovaný počet konečných bodů samozřejmě není shodný s konečným, vzhledem k tomu, že algoritmus musí dodržet kritéria Poissonova diskového rozložení. Tato vzorkovaná vrstva se 120 008 body je uložena na příloženém CD-ROM v adresáři *3D_model/BRANA_cloud_120k.ply*. Z původního zdrojového souboru tedy algoritmus vybral 7 % bodů, jedná se však o dostatečný základ pro budoucí model. Datový objem klesl z 55,3 MB na 2,8 MB.



Obr. 31 Volba parametrů pro filtr Poisson disk Sampling (zdroj: vlastní tvorba)

5.2.B. Georeferencování mračna bodů

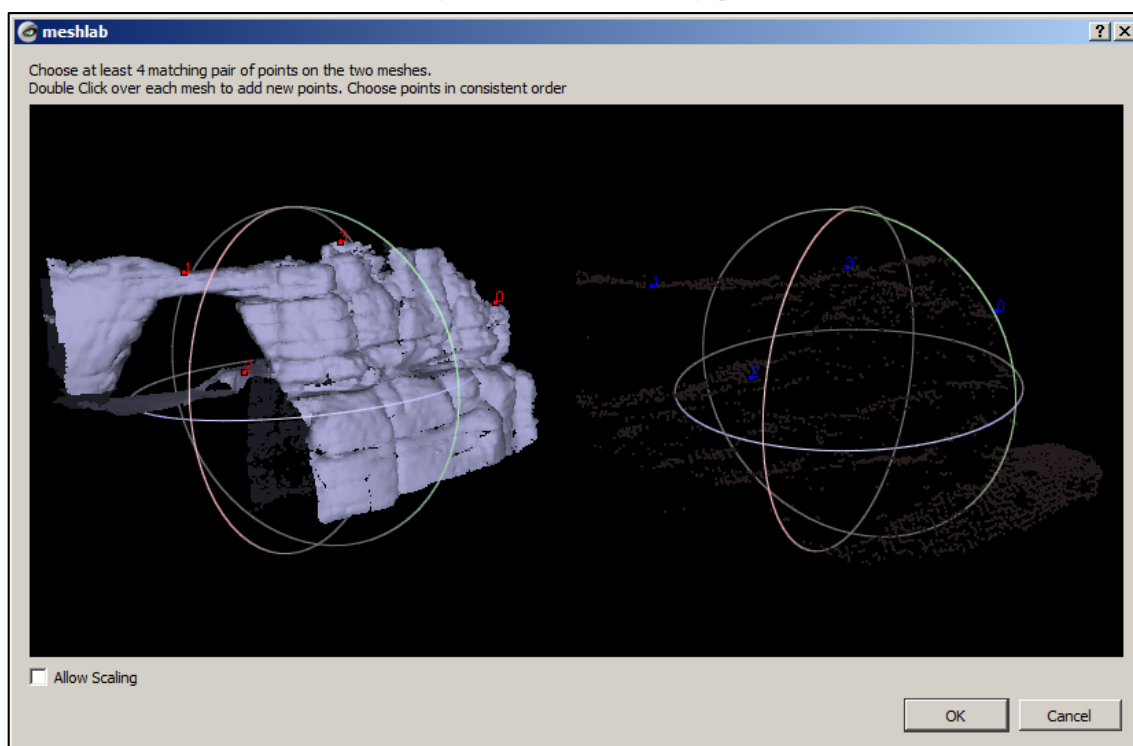
Jak jsem se již zmínil v kapitole o datech, bodové mračno pokrývající Pravčickou bránu je zaměřeno pouze v modelovém souřadnicovém systému. Je to kompaktní soubor dat, kde jednotkou souřadnic je metr, avšak jejich hodnoty neodpovídají systému, který je použit při tvorbě modelu terénu. Přestože byla obě mračna translací posunuta do stejné úrovně číselného řádu, stále jsou vůči sobě jinak natočena a posunuta. Je proto nutné provést orientaci tohoto mračna do referenčního souřadnicového systému. Tento proces lze nazvat také jako georeferencování a jeho hlavní úlohou bude ztotožnění alespoň tří polohově téměř identických dvojic bodů. Zvoleným vlíčovacím bodům v mračnu terénu by měly odpovídat vybrané body v mračnu Pravčické brány. Protože se nebude měnit jednotkové měřítko souborů dat (v žádném směru) a orientaci brány určují pouze úhly rotace kolem třech souřadnicových os a translace ve směru x, y a z, jedná se o shodnostní transformaci souřadnic v trojrozměrném prostoru. K základnímu výpočtu transformace je potřeba nalézt právě 3 dvojice bodů. Body v obou mračnec však mají různé rozestupy a nelze zaručit, že se body mračen po ztotožnění budou 100% překrývat, i vzhledem k jejich rozdílné velikosti, hustotě, atp. Hlavním problémem je také nejednoznačnost výběru identických bodů, kterou však nelze odstranit. Po tomto kroku lze tedy očekávat poměrně velké odchylky, které celý model zorientují nepřesně.

Georeferencování mračna pozemního skenování bude provedeno ve dvou krocích:

1. Hrubá orientace, která spočívá v nalezení alespoň 3 identických bodů v obou mračcích
2. Aplikace algoritmické metody Iterative Closest Point (ICP), jenž se postará o doladění prvního manuálního kroku a iterativně vypočte finální orientaci P. brány.

I. Hrubá orientace výběrem vlíčovacích bodů

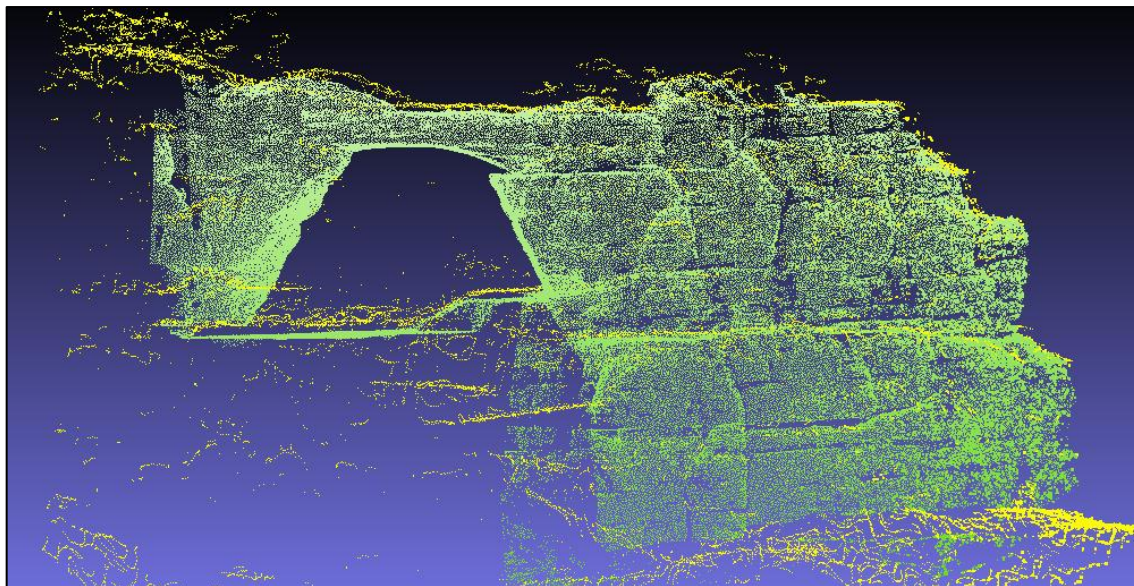
Mračno P. brány hrubě zorientuji v programu MeshLab, kde je možné interaktivně vybírat identické body pro výpočet transformace. U textového souboru s částí terénu opět kvůli kompatibilitě změním koncovku z TXT na ASC. Do programu naimportuji obě připravená mračna, které se načtou jako 2 oddělené vrstvy a spustím nástroj Align. MeshLab používá pro označení referenční vrstvy anglické slovo *glue*, což znamená doslova přilepit. Referenční mračno terénu tedy „přilepím“ do jeho souřadné soustavy tak, že vrstvu označím a zvolím Glue Here Mesh, přičemž se vedle ní zobrazí hvězdička (*). Po výběru druhé vrstvy (mračno P. brány) a volbě Point Based Glueing se otevře nové okno se 3D zobrazením obou mračen, kde se vybírají vlíčovací body pro transformaci.



Obr. 32 Nástroj Align v programu MeshLab (zdroj: vlastní tvorba)

Na obr. 32 je toto okno vyobrazeno s již označenými body, které jsem vybíral na základě vizuální podobnosti mračen. Měly by to být body alespoň částečně význačné. Jsou to nejvyšší (3) a nejnižší bod (0) a dále body na vrchu oblouku (1) a v jeho spodní části (2). Přesnější manuální výběr znemožňuje jak malá hustota mračna terénu, tak i skutečnost, že jeho body jsou pouze v 2,5D reprezentaci. Volba Allow scaling musí zůstat „nezatrhnutá“, protože oba datasets mají stejné měřítko. Po potvrzení se vypočte matice transformace a model brány se díky translaci, rotaci a následnému vyrovnaní částečně

zorientuje do referenčního souř. systému. Transformační matici je nutné do vrstvy uložit volbou Freeze Current Matrix. Takto transformovanou vrstvu uloží jako nový PLY soubor *BRANA_cloud_aligned.ply*. Na obr. 33 je vidět výsledek této částečné orientace. V odstínu zelené je 3D mračno brány, žluté je 2,5D mračno terénu.

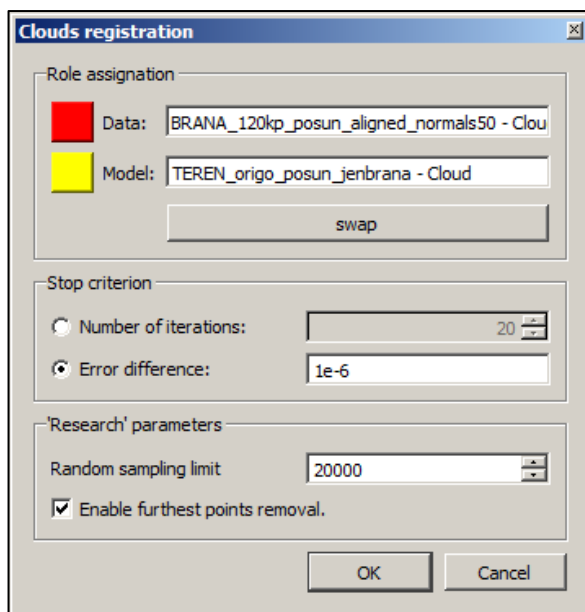


Obr. 33 Výsledek hrubé orientace mračna P. brány (zdroj: vlastní tvorba)

Dosažený výsledek částečného ztotožnění dokazuje podobnost datových souborů, avšak stále je patrný velký rozdíl ve vzájemném posunutí obou modelů. Opakováním předešlého postupu bych se pravděpodobně po určitém čase dostal k uspokojivému výsledku, ale byla by to práce zdoluhavá. V dalším kroku tedy využiji avizovaného algoritmického přístupu, díky metodě Iterative Closest Point (ICP), kterou blíže vysvětluji v řešeršní části práce.

II. Přesná orientace metodou ICP

Algoritmický výpočet pomocí ICP je implementován jak v programu MeshLab, tak v CloudCompare. V MeshLab se mi její funkcionalitu nepovedlo ověřit, protože veškerá snaha byla doprovázena chybovými hláškami. V CloudCompare funguje metoda bezchybně. Obě mračna je potřeba načíst do prostředí programu jako vrstvy, označit je a vyvolat nabídku Register entities (na obr. 34).



Obr. 34 Nastavení parametrů algoritmu ICP (zdroj: vlastní tvorba)

Prvním zadávaným parametrem je výběr rolí:

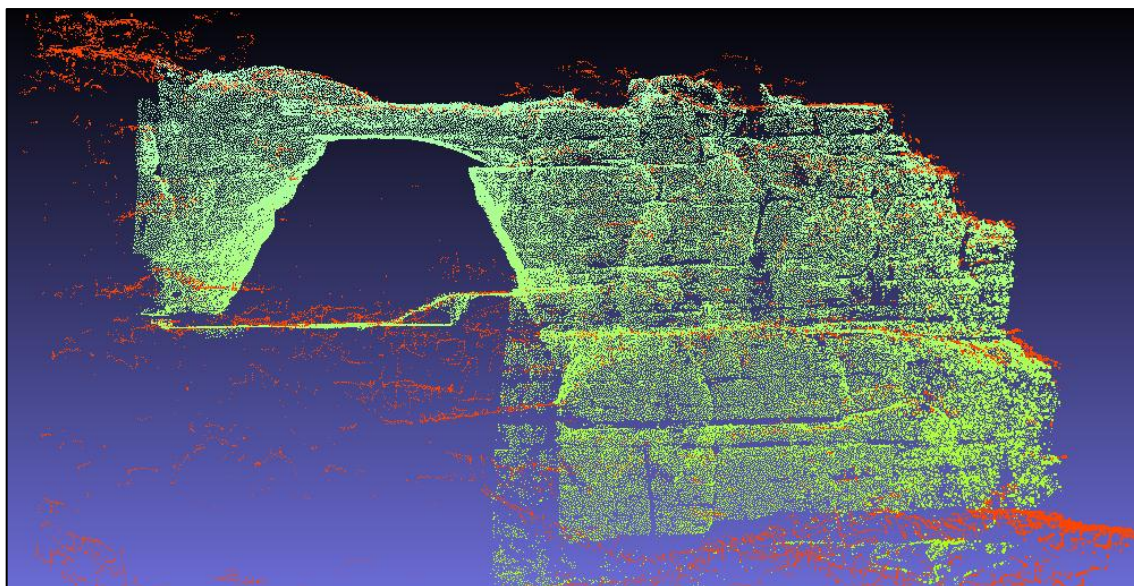
- *Data* – mračno, pro které hledáme transformační matici, tedy 3D mračno P. brány
- *Model* – referenční mračno tedy mračno 2,5D terénu.

Pole je možno prohodit pomocí tlačítka swap. Další možností je výběr kritéria pro ukončení algoritmu. Je možné vybírat mezi samotným počtem iterací nebo střední kvadratickou odchylkou, která se vypočte po každé iteraci. Stačí nastavit dostatečně malou odchylku, aby algoritmus proběhl ve více iteracích a finální výsledek byl přesnější. Výhodné je také povolit volbu Enable furthest points removal, která z procesu vyřadí odlehlé body. Po spuštění algoritmu se proces zastavil po 200 iteracích, jakmile se hodnota střední kvadratické odchylky snížila na zadanou mez. Matice transformace tohoto posledního kroku je na obr. 35. Soubor je ve složce *3D_model/BRANA_cloud_UTMmoved.ply*.

0.999638676643	-0.025208139792	-0.009436817840	8.201440811157
0.025041485205	0.999536037445	-0.017381086946	-3.162920236588
0.009870578535	0.017138479277	0.999804973602	-6.438317775726
0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000	1.000000000000

Obr. 35 Matice transformace (zdroj: vlastní tvorba)

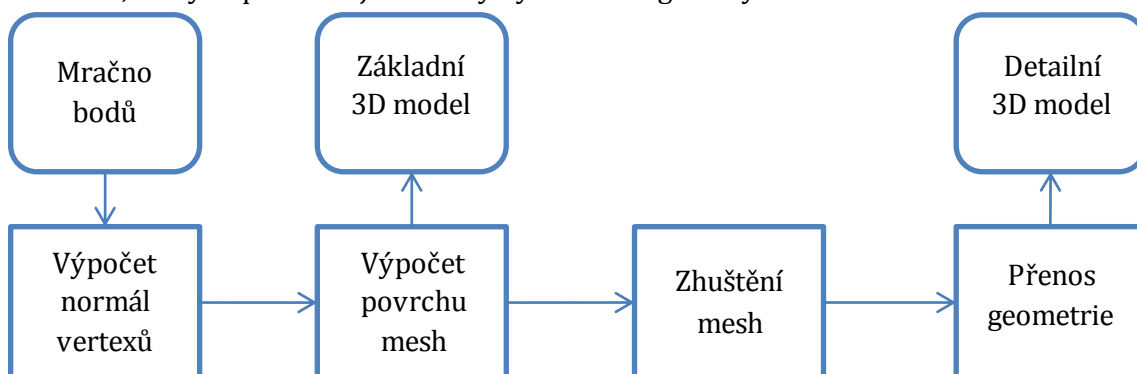
Celkový pohled na obě mračna po provedení obou kroků transformace je vyobrazen na obr. 36, na kterém je vidět, že červené body terénu sledují tvar Pravčické brány. To jsem ověřil detailními pohledy na vrchní část oblouku brány, dále na plošinu při spodním okraji a také na ochoz, který vede po západní stěně.



Obr. 36 Velmi přesné ztotožnění po aplikaci algoritmu ICP (zdroj: vlastní tvorba)

5.2.C. Tvorba 3D modelu

V této fázi jsou již připravená veškerá podkladová data pro tvorbu 3D modelu Pravčické brány. Nejprimitivnějším způsobem, jak vytvořit model, by bylo spojovat jednotlivé vertexy manuálně, a tak vytvořit jakousi povrchovou síť s plnou uživatelskou kontrolou nad průběhem. Spojení tisíců bodů ručně je však prakticky nereálné. Jako nadstavba tohoto postupu by se dala využít funkce, které by uživatel určil vertexy, nad kterými by funkce triangulací vytvořila síť. Takovouto funkcionalitu jsem objevil v modelovací aplikaci SketchUp s přídatným pluginem. Ale i v takovémto případě by byl manuální vstup uživatele obrovský. Z rýze praktických důvodů jsem tedy opět přistoupil k využití již uvedených algoritmů pro rekonstrukci povrchu. Tvorbu 3D modelu z bodového mračka jsem rozdělil do několika fází, přičemž každá má svou podstatnou úlohu. Nástin procesu uvádím níže ve workflow na obr. 37. Na celém procesu budu pracovat v programu MeshLab, který implementuje všechny využívané algoritmy.

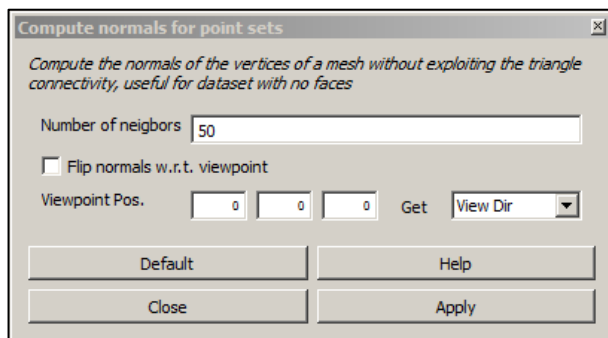


Obr. 37 Postup tvorby 3D modelu Pravčické brány (zdroj: vlastní tvorba)

I. Určení normál

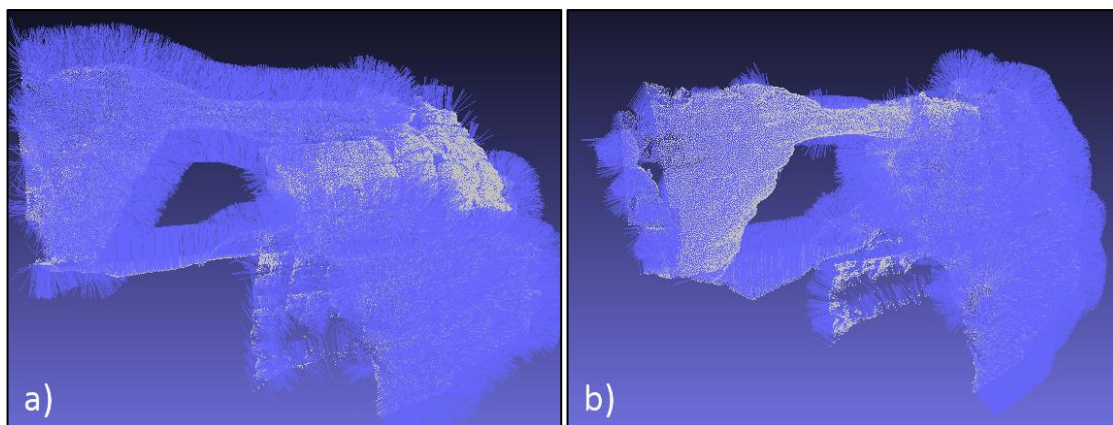
První fáze spočívá ve výpočtu normál k bodovému mračnu. Normály jsou podstatné pro další krok, protože jejich orientace určuje směr, kterým je orientována izoplocha vznikající

při rekonstrukci povrchu. Pro výpočet normál v MeshLab slouží funkce Compute Normals for Point Sets ukrytá v menu Filters ve skupině Normals, Curvatures and Orientation. Zobrazí se malý dialog s volbou parametrů, jako na obr. 38.



Obr. 38 Zadání parametrů pro výpočet normál (zdroj: vlastní tvorba)

Výpočet lze nastavit tak, aby normály směřovaly k danému bodu nebo byly vypočteny na základě polohy nejbližších sousedů. Volba počtu těchto blízkých bodů ovlivňuje jejich globální orientaci a je nutné testováním nalézt vhodný počet. Malý počet sousedů zajistí správnou orientaci normál v oblastech podobného průběhu povrchu, ale v celkovém pohledu jsou normály nekonzistentní. Příliš velké množství naopak celému datasetu nutí určitou směrovou uniformitu, která neodpovídá reálné podobě. Ukázky je možné zhlédnout na obr. 39, kde jsou vyobrazeny normály (modře) vypočtené na základě polohy 5 (obr. 39a) a 100 nejbližších sousedů (obr. 39b). Na obou obrázcích je vidět, že normály korektně nepopisují reálný stav. Nejlepších výsledků jsem dosáhl při výpočtu z 50 bodů. Soubor vertexů s normálami je uložen jako soubor *BRANA_cloud_120k_normals50.ply*.



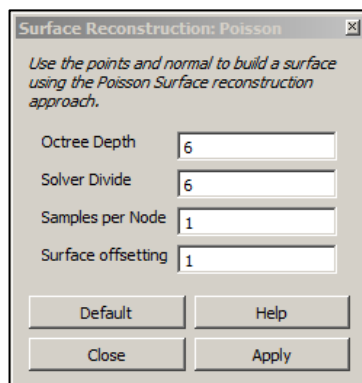
Obr. 39 Vypočtené normály na bodovém mračnu (zdroj: vlastní tvorba)

II. Tvorba povrchu mesh

Po výpočtu a kontrole normál mohu přistoupit k rekonstrukci povrchu pomocí vybrané Poissonovy metody vytvářející vodotěsné povrchy. Princip metody zmiňuji v rešerši.

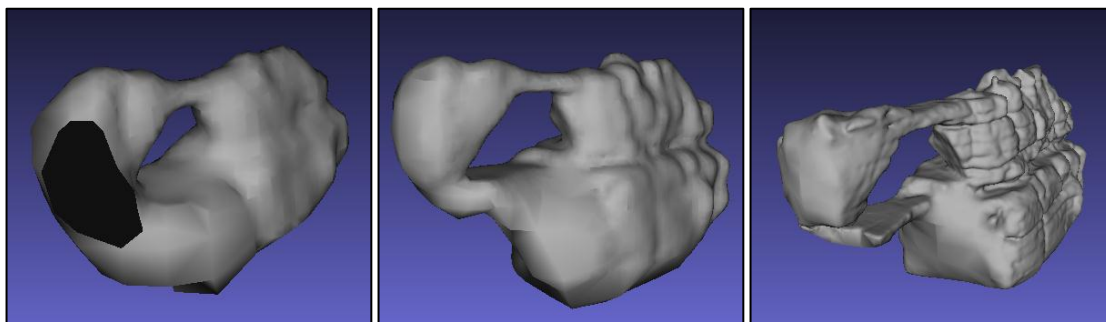
Vyvolaná funkce (Filters – Point Set) dovoluje nastavení hloubky oktantového stromu. Tuto hloubku reprezentuje parametr Octree Depth. Celé číslo v poli Solver Divide udává hloubku, do které bude pro řešení Laplaceových rovnic použita Gauss-Seidelova iterační metoda, která má menší paměťovou náročnost. Samples per Node udává počet vzorků,

tedy bodů, které budou zahrnuty do buňky oktantového stromu. Čím více vzorků, tím je výsledný model hladší, ale za cenu ztráty detailů a hodí se tak spíše pro nefiltrovaná mračna. Koeficient Surface offsetting značí, jak bude povrch vzdálen od bodového mračna. Pro přesnou aproximaci je hodnota rovna 1 (Manuál MeshLab, 2009). Nastavení parametrů viz obr. 40.



Obr. 40 Parametry Poissonovy rekonstrukce povrchu (zdroj: vlastní tvorba)

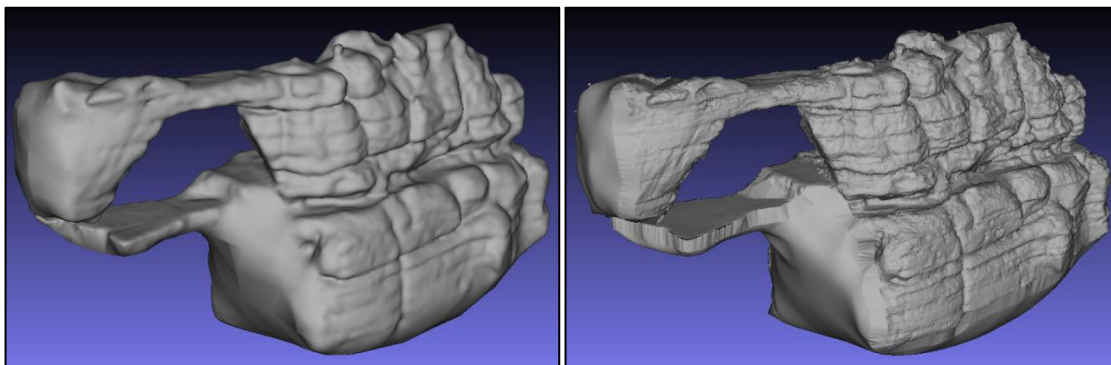
Na příkladech níže demonstruji rozdílnou míru zachovalých detailů při změně parametru hloubky octree, kde je popořadě modelováno na hloubce 5, 6 a 8 (obr. 41). Při vyšších hloubkách octree byl software již značně nestabilní a nedostal jsem se k zdárným výsledům. V dalších krocích tak budu pracovat nad nejdetailnějším modelem vzniklým na hloubce 8. Vypočtený Poissonův povrch je tvořen 66 564 vertexy, mezi nimiž je triangulováno 133 124 trojúhelníkových plošek. Soubor je uložen pod názvem *BRANA_mesh_afterPoisson.ply*.



Obr. 41 Vliv hloubky octree na míru detailu (zdroj: vlastní tvorba)

Jelikož je povrch zkonstruován ze vzorků, které spadaly do octree krychle o hraně délky zhruba 0,3 m, mohly v takto vypočteném mračnu vertexů (bodové síť povrchu) zmizet detaily, které jsou menší než hrana krychle v největší octree hloubce. Z toho důvodu je možné provést tzv. dělení trojúhelníkových hran (edge subdivision), jejichž hrana je menší než zvolená mez. Tím se mesh rozpadne na více trojúhelníkových plošek. Z Původního bodového mračna poté přeneseme atributy (polohy a normály) na nový mesh, čímž se zpřesní tvar celého modelu. To zajistí funkce Vertex Attribute Transfer. Porovnání obou modelů je možné zhlédnout na obrázku 42, kde vlevo je původní model po Poissonově rekonstrukci a vpravo zahuštěný model s dodanou geometrií. Modely se dosti

význačně liší i svým datovým objemem. Model s vyšším rozlišením zabírá bezmála dvakrát vyšší paměťový prostor, což je způsobeno tím, že obsahuje dvakrát větší počet vertexů a plošek. Detailnější model je uložen v souboru *BRANA_mesh_detail.ply*.



Obr. 42 Porovnání modelů s rozdílným rozlišením (zdroj: vlastní tvorba)

5.3 Integrace 3D modelu skalní brány do TIN modelu terénu

V této kapitole se zabývám integrací obou vytvořených modelů, tedy 2,5D TIN modelu terénu a 3D modelu Pravčické brány. Zvolil jsem metodu importu trojúhelníkové sítě 3D modelu do prostředí ArcGIS. Model P. brány je nyní veden v posunutém souřadném systému WGS 84 33N s nezměněnou výškovou polohou, a proto budu muset provést lineární translaci v rovině. Nakonec provedu úpravy TIN modelu, aby 3D model do terénu zasedl bez rušivých překryvů.

5.3.A. Import modelu do ArcGIS

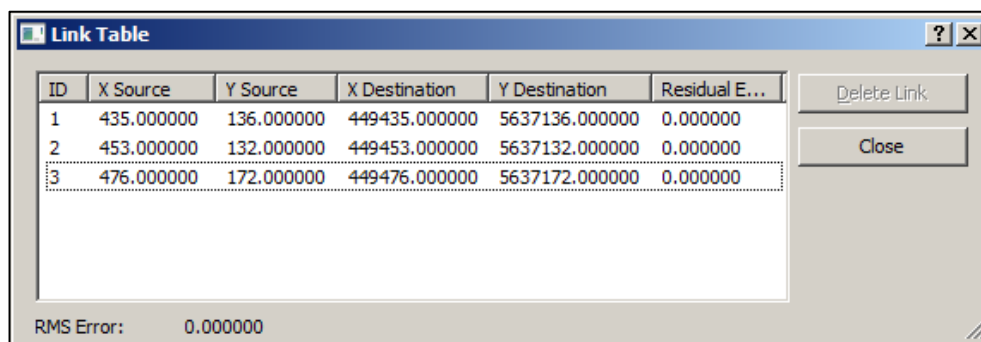
Program MeshLab, ve kterém byl model vytvořen, nabízí širokou škálu formátů, do kterých lze vektorové modely exportovat. Podmínku kompatibility mezi výstupními formáty MeshLab a těmi, které akceptuje na vstupu ArcGIS splňují formáty standardu VRML a DXF. Při pokusu importovat objekty typu VRML, jsem vždy dospěl k chybové hlášce. Problém by mohl spočívat v chybném exportu z MeshLab, ovšem to se mi nepodařilo ověřit. Precizně však zafungoval import formátu DXF, jež je standardem pro všechny CAD systémy. V MeshLab stačí zvolit volbu exportu do tohoto formátu a soubor poté v ArcGIS importovat díky konverznímu nástroji CAD to Geodatabase. Na jeho vstupu je DXF soubor a cesta k cílové databázi. Výstupem funkce je vrstva linií, polygonů a multipatch.

5.3.B. Translace do referenčního souř. systému

V této fázi upravím soubor dat z posunutých, do reálných souřadnic systému WGS 84 UTM 33N. Vrstvy importované v předchozím kroku je nutné před translací exportovat např. do formátu shapefile, protože s původními vrstvami mi program při ukládání dat padal. Postačí provést export pouze jedné vrstvy, a to multipatch, která se v prostředí GIS používá pro reprezentaci 3D modelů (Esri, 2008). Tuto vrstvu jsem exportoval do

shapefile. Konečný 3D model v ESRI formátu je ve složce *3D_model/BRANA_shapefile_UTM.zip* (v archivu).

Translaci modelu nastavím v panelu Spatial Adjustment, kde jako typ transformace vyberu Similarity transformation (podobnostní transformaci). V praxi se však bude jednat o shodnostní transformaci s dvěma parametry – posunu po osách x a y. Do mapového pole nakreslím 3 vodící linky, kterým poté ve spojovací tabulce změním hodnoty tak, aby se zvýšily na souřadnici x o 449 000 a na souřadnici y o 5 637 000. Příklad posunu je uveden na obr. 43. Volbou Adjust se posunou souřadnice všech prvků a budou správně vyjadřovat polohu objektu v souřadném systému WGS 84 33N. Tyto změny je potřeba uložit na panelu Editing a ukončit editaci.



ID	X Source	Y Source	X Destination	Y Destination	Residual E...
1	435.000000	136.000000	449435.000000	5637136.000000	0.000000
2	453.000000	132.000000	449453.000000	5637132.000000	0.000000
3	476.000000	172.000000	449476.000000	5637172.000000	0.000000

RMS Error: 0.000000

Obr. 43 Spojovací tabulka pro translaci modelu (zdroj: vlastní tvorba)

5.3.C. Úprava modelu terénu

Poslední fází praktické části je úprava terénního modelu TIN. Po zasazení modelu brány do TINu je totiž jasně vidět, že se vzájemně protínají, což působí velmi rušivě. V modelu TIN tedy hromadně změním výšku trojúhelníkových plošek, které se nachází na území pokrytém 3D modelem. Po vizuální kontrole výsledku následně provedu finální manuální editaci povrchu TIN.

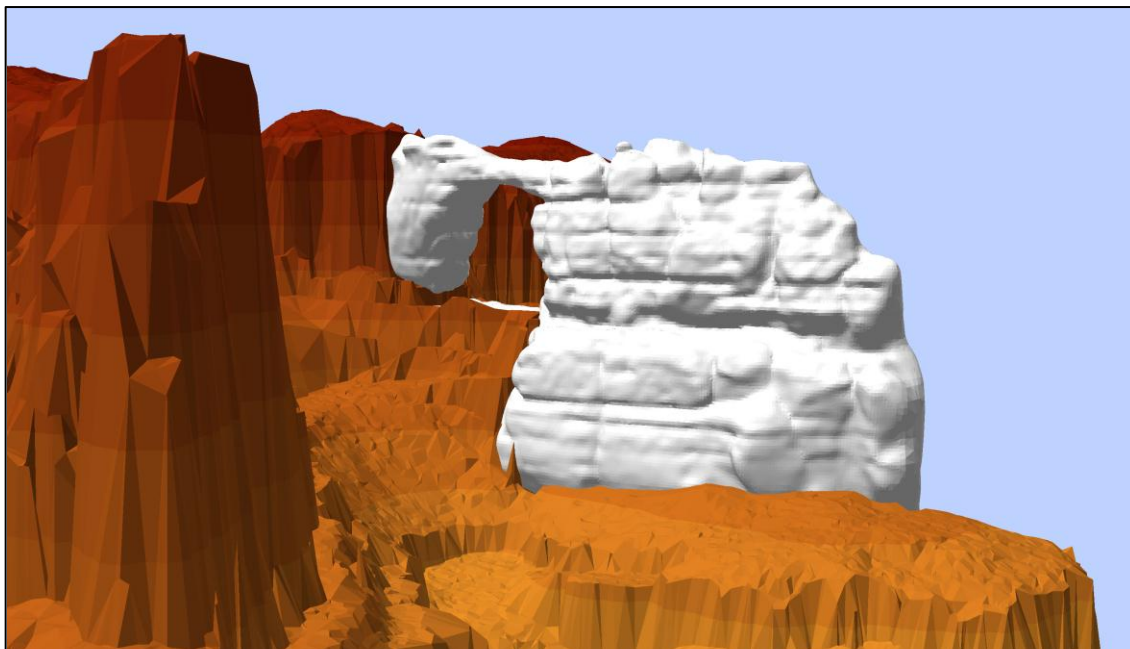
Abych mohl hromadně změnit výšku v oblasti 3D modelu, musím nalézt takový polygon, který vhodně kopíruje proměnlivý tvar modelu brány. Ve spodní části 3D modelu je totiž vodorovný průřez menší, než ve vyšších partiích. Pro tento účel jsem vymezil 3 hlavní části, které jsou na rozhraní 3D modelu a TINu:

- hrany ve spodní části modelu s nejnižší elevací
- dolní část oblouku P. brány (na umělé plošině)
- vrchní partie skalního oblouku v severovýchodním cípu.

Vizuální interpretací v ArcScene jsem zjistil výškové intervaly, ve kterých se tyto rozhraní nachází. Poté pomocí dotazovací funkce Select by Attributes jsem v atributové tabulce modelu multipatch vyseletoval tato rozhraní právě na základě výškové informace a exportoval jako nové vrstvy. Tato jednotlivá rozhraní jsem nechal současně zobrazit a ručně jsem okolo nich vytvořil polygon, tvořící v podstatě obalovou zónu okrajů. Polygonová vrstva obsahující právě jeden ohraničující polygon je vstupem do funkce Edit TIN jako položka softreplace – nahradí výškový atribut u ohraničených uzlů.

Po opětovné kontrole v ArcScene zjišťuji, že výsledek předchozího procesu není ideální, a proto v ArcMap přistupuji k manuální editaci povrchu opět pomocí modulu TIN Editing. Tímto způsobem vyhladím povrch podél rozhraní, aby na sebe oba modely dobře navazovaly. Finální TIN upravený pro integraci 3D modelu Pravčické brány je uložen ve složce *2.5D_model_terenu* pod názvem *TIN_UTM_hole*.

Když se v ArScene načte jak finální TIN, tak multipatch 3D modelu, vznikne hybridní scéna. Výsledný pohled na scénu je možné zhlédnout na obr. 44. Další zobrazení z různých úhlů jsou přiloze, případně je lze vizualizovat načtením dat z příloženého DVD-ROM.



Obr. 44 Pohled na integrovaný 3D model (zdroj: vlastní tvorba)

KAPITOLA 6

Diskuze a závěr

Tématem a cílem této bakalářské práce byla tvorba 3D modelu Pravčické brány a jeho integrace do 2,5D modelu terénu. Postup práce a dílčí cíle – rešerši literatury, filtrování lidarových dat, tvorba 3D mesh a integraci obou modelů – shrnuji na dalších řádcích.

V úvodu do problematiky jsem provedl rešerši dostupné literatury. Zde jsem se věnoval principu metody laserového skenování od jeho fyzikální podstaty, přes průběh skenování, až po samotný výstup v podobě bodového mračna. V další části jsou představeny aspekty umístění modelů do jednoznačně identifikovatelného prostoru, jako je souřadný systém a transformace souřadnic. Přehled datových struktur pro reprezentaci 3D modelů již naznačoval další podstatnou podkapitolu, kde se zabývám metodami rekonstrukce povrchu z bodových mračen. Většina publikací, ze kterých jsem čerpal je zahraniční, což je způsobeno větším využitím laserové skenovací technologie ve vyspělejších zemích. Podstatnou část informací o modelování jsem čerpal ze zdrojů věnujících se počítačové grafice. V praktické části jsem však dokázal, že stejné přístupy jsou aplikovatelné i při tvorbě modelu objektu, který je součástí přírodní krajiny.

Důležitým předpokladem pro kvalitní model skutečnosti jsou přesná zdrojová data. Ta byla poskytnuta Správou Národního parku České Švýcarsko ve dvou sadách. První bodové mračno bylo nasnímáno letecky a pokrývá území o velikosti 16 hektarů, jehož součástí je již zmíněná Pravčická brána. Tento velmi známý útvar pokrývá právě druhý soubor dat, který byl získán pozemní metodou skenování. Mračno Pravčické brány bylo již dodavatelem dat očištěné od šumu, zatímco mračno reprezentující terén obsahovalo jak terénní body, tak i všechny ostatní body spojené s terénem (např. stromy, budovy atp.). Filtrování těchto dat bylo jedním z dílčích úkolů.

Praktické části jsem začal tvorbou digitální reprezentace terénu. Jak jsem již avizoval, bylo nutné provést klasifikaci mračna bodů. Tématu klasifikace se věnovalo velké množství autorů. Na základě zjištěných informací jsem vybral vhodnou metodu, jejíž implementaci poskytl program ALDPAT. Aplikace automatické filtrace dat přinesla zmenšení vzorku na zhruba 21 % původního počtu bodů. Takto odfiltrovaná data jsem importoval do ArcGIS a přistoupil k tvorbě modelu terénu. Jako datový model jsem vybral TIN, jenž uchovává nepravidelnou trojúhelníkovou síť. Po vizuální kontrole výsledků jsem

přistoupil k časově náročné manuální editaci a vyhladil ta místa, kde zůstaly zbytky vegetace.

Nejvíce času jsem strávil seznamováním se s principy 3D modelování a metodami jejich praktické aplikace. Implementace modelovacích algoritmů by značně přesáhla rámec této práce, a proto jsem hledal software, který by algoritmy implementoval. Na trhu se nachází množství komerčních software, které modelování umožňují, ale ty nejsou běžně dostupné pro nekomerční uživatele. Z tohoto důvodu jsem pátral spíše po open-source aplikacích. Dva programy splnily má očekávání, a to MeshLab a CloudCompare. Už jejich názvy vypovídají o jejich účelu.

Software CloudCompare implementoval algoritmus pro přesné ztotožnění dvou bodových mračen, jež bylo nezbytným doplněním hrubé orientace, kterou jsem provedl volbou vlíčovacích bodů.

Do MeshLab autoři implementovali obrovskou škálu různých vzorkovacích filtrů, rekonstrukčních algoritmů a dalších funkcí pro práci s mesh – povrchem. Testováním dostupných metod a hledáním optimálních parametrů jsem si vytvořil ucelený přehled o možnostech tohoto programu a modelování celkově. Nejlepších výsledků při rekonstrukci povrchu jsem dosáhl s Poissonovým přístupem, se kterým byl také vytvořen finální model reprezentovaný trojúhelníkovou sítí.

V průběhu práce jsem se musel vypořádat s některými překážkami, jako bylo přesouvání mračen a modelů v rámci souřadnicového systému, protože programy MeshLab a CloudCompare způsobovaly ztrátu přesnosti při zpracovávání hodnot velkého ciferního rozsahu.

Kvalitu provedení datových modelů jsem nemohl porovnat s jinou referencí, neboť takové pravděpodobně ani neexistují. Možné by bylo geodetické zaměření Pravčické brány a porovnání význačných rozměrů, případně změření rozměrů laserovým dálkoměrem. Obě zmiňované varianty však byly mimo moje možnosti. Spíše ani nemá smysl zabývat se rozměrovou přesností modelu, neboť je sám o sobě určen právě laserově zaměřenými body. Otázka se tedy posouvá do roviny přesnosti měřicích přístrojů. Kvalitu nicméně určuje i míra detailu, který je 3D model schopen zobrazit. V tomto ohledu je mnou vytvořený model méně detailní, než kdyby byl vytvořen z původního mračna, jelikož prošel procesem vzorkování. Zmenšit objem dat jsem však musel, abych byl vůbec schopný model vytvořit na dostupném hardware.

Hlavní cíl, jenž nese i název této bakalářské práce, jsem podle mého názoru splnil. Vytvořil jsem digitální model terénu očištěný od prvků, jež nejsou jeho součástí. Do tohoto modelu jsem zasadil detailní 3D model Pravčické brány a celý systém uvedl do souřadného systému WGS 84 se zobrazením UTM. Jako mírný nedostatek na mé práci hodnotím způsob, jakým jsem provedl integraci 3D modelu do terénu. Přechod dvou modelů by možná mohl být vyveden s větší precizností, avšak nebral jsem v úvahu, že se na tomto modelu budou vytvářet nějaké komplexní analýzy krajiny a na vizuální prezentaci je

taková integrace více než dostačující. Řešením by mohl být zásah do topologie obou modelů a spojení jejich nejbližších vertexů nebo přemodelování všech dat do stejné datové struktury. Takové možnosti však ArcGIS neposkytuje a bylo by nutné využít jiných programů či vlastní implementace.

Mnou vytvořený hybridní 2,5D a 3D model oblasti Pravčické brány prozatím nepředpokládá nějaké aktuální využití jiné než prezentační. Nicméně možnosti se skýtají obrovské. Už samotný fakt, že Pravčická brána byla naskenována, umožní její digitální uchování pro budoucí generace. V případě analýzy klimatologických dat a určení směru převládajících větrů a dalších vlivů, by se dal vytvořit model zvětrávání, který by mohl pomoci učinit kroky k zachování této přírodní památky.

SEZNAM ZDROJŮ

Seznam literatury

- ABDUL-RAHMAN, A. ; PILOUK, M. 2008. *Spatial Data Modelling for 3D GIS*. Springer-Verlag, 2008, 290 s.
- ABDULAH, A. F. ; RAHMAN, A. A. ; VOJINOVICZ. 2009. Lidar filtering algorithms for urban flood application : review on current algorithms and filters test. In: BRETAR, F.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. ; VOSSELMAN, G. (eds.). *Laser scanning. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Paris, 2009, s. 30-36.
- AXELSSON, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000, roč. 33, část B4, 2000, s. 110-117. Dostupné z http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/111_XXXIII-part4.pdf.
- BACHMAN, C. G. 1979. *Laser radar systems and techniques*. Artech House, 1979, 203 s.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 1999, č. 54, s 199-214. Dostupné z
- BAYER, T. 2008. *Algoritmy v digitální kartografii*. 1. vyd. Praha : Karolinum, 2008, 252 s.
- BESL, P. J. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992, roč. 14, č. 2, s. 239-256. Dostupné z <http://eecs.vanderbilt.edu/courses/cs359/other_links/papers/1992_besl_mckay_ICP.pdf>.
- BERNARDINI, F. ... [et al.]. 1999. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 1999, roč. 5, č. 4, s. 349-359. Dostupné z <http://www.research.ibm.com/vistechology/pdf/bpa_tvcp.pdf>.
- CIMBÁLNÍK, M. ; ZEMAN, A. ; KOSTELECKÝ, J. 2007. *Základy vyšší a fyzikální geodézie*. 1 vyd. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007, 218 s.
- COMNIO, P. 2006. *Mathematical and computer programming techniques for computer graphics*. 1st ed. Springer, 2006, 567 s.
- CRAMER, M. 2001. On the use of direct georeferencing in airborne photogrammetry. In: *Proceedings 3rd, International Symposium on Mobile Mapping Technology*. Cairo, 2001, Session I, Paper 2, s. 1-13. Dostupné z <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.516&rep=rep1&type=pdf>>.

- EDELSBRUNNER, H. ; MÜCKE, P. 1994. Three-dimensional Alpha Shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 1994, roč. 13, č. 1, s. 43-73. Dostupné z <<http://www.cs.duke.edu/~edels/Papers/1994-J-04-3DAlphaShapes.pdf>>.
- HAIYANG, Y. ... [et al.]. 2010. Digital terrain model extraction from airborne LiDAR data in complex mining area. In: *18th International Conference on Geoinformatics*. Beijing, 2010, s. 1-6.
- CHALUPECKÝ, V. 2005. *Počítačová grafika : Modelování pevných těles* (studijní text) [online]. Praha : FJFI ČVUT, 2005 [cit 2012-08-15], 12 s. Dostupné z <<http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~haiduada/pogr-12-modelovaniteles.pdf>>.
- KAZHDAN, M. ; BOLITHO, M. ; HOPPE, H. 2006. Poisson surface reconstruction. In: *Eurographics Symposium on Geometry Processing '06*. 2006, s. 61-70. Dostupné z <<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/poissonrecon.pdf>>.
- KOLÁŘ, J. ; HALOUNOVÁ, L. ; PAVELKA, K. 1997. *Dálkový průzkum Země 10*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1997, 164 s.
- KRAUS, K. ; PFEIFER, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 1998, roč. 53, č. 4, s. 193-203. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271698000094>>.
- KŘEMEN, T. 2004. Testování laserového skenovacího systému Cyrax 2500. In: *Odborná konference doktorského studia JUNIORSTAV 2004*. Brno, 2004. Dostupné z <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_01_Prakticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Kremen_Tomas.pdf>.
- LI, R. 1994. Data structures and application issues in 3-D geographic information systems. *Geomatica*. 1994, roč. 48, č. 3, s. 209-224.
- MCCOOL, M. ; FIUME, E. 1992. Hierarchical Poisson disk sampling distributions. In: *Proceedings of the conference on Graphics interface '92*. Vancouver, 1992, s. 94-105.
- NEWMAN, T. ; YI, H. 2006. A survey of the marching cubes algorithm. *Computer & Graphics*. 2006, roč. 30, č. 5, s. 854-879. Dostupné z <<http://www.proxyarch.com/util/techpapers/papers/survey%20of%20marching%20cubes.pdf>>.
- NOVOTNÝ, L. 2008. *Aproximace a detekce kolize pomocí alfa-obalů* [online]. Brno, 2008, [cit. 2012-08-12]. 47 s. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Dostupné z <http://is.muni.cz/th/60671/fi_m/dp.pdf>.
- PAVELKA, K. 2009. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2009, 200 s.
- PFEIFER, N. 2008. LiDAR Data Filtering and DTM Generation. In: *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing*. CRC Press, 2008. Chap. 11, s. 310-333.

- SITHOLE, G. ; VOSSelman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 2004, č. 59, s. 85-101.
- SCHÜTZ, CH. ; HÜGLI, H. 1995. Recognition of 3-D objects with a closest point matching algorithm. In: *ISPRS Intercommission Workshop „From Pixels to Sequences“*. Zurich, 1995, s. 128-133. Dostupné z <<http://www.unine.ch/parlab/pub/pdf/1995-ISPRS-1.pdf>>.
- SHAN, J. ; TOTH, C. 2008. *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing*. 1st Ed. CRC Press, 2008. 590 s.
- SHIRLEY, P. 1991. Discrepancy as a Quality Measure for Sample Distributions. In: *Proceedings of Eurographics'91*. 1991, s. 183-193. Dostupné z <<http://www.cs.utah.edu/~shirley/papers/euro91.pdf>>.
- STOTER, J. ; ZLATANOVA, S. 2003. 3D GIS where are we standing?. In: Joint Workshop on Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis. Quebec, 2003. Dostupné z <http://www.gdmc.nl/publications/2003/3D_GIS.pdf>.
- VOŽENÍLEK, V. 2004. *Aplikovaná kartografie I. : Tematické mapy*. 2. vyd. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2004, 187 s.
- WEHR, A. ; LOHR, U. 1999. Airborne laser scanning : an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Amsterdam : Elsevier Science. 1999, roč. 54, č. 2/3, s. 68–82. Dostupné z <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.516&rep=rep1&type=pdf>>.
- ZHOU, K. ... [et al.]. 2011. Data-Parallel Octrees for Surface Reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, roč. 17, č. 5, s. 669-681. Dostupné z <<http://www.kunzhou.net/2010/ParallelOctree-preprint.pdf>>.
- ŽÁRA, J. ... [et al.]. 2005. *Moderní počítačová grafika*. 2. vyd. Computer Press, 2005, 608 s.

Elektronické zdroje

- ARCDATA PRAHA, s.r.o. 2012. *Přehled souřadnicových systémů používaných na území ČR a SR v ArcGIS 10* [online]. 2012 [cit. 2012-08-15]. Dostupné z <<http://www.arcdata.cz/podpora/tipy-a-triky/Detail/?contentId=110111>>.
- BAYER, T. 2008. Digitální modely terénu [online]. 2008 [cit. 2012-08-10]. Dostupné z <<http://web.natur.cuni.cz/~bayertom/IM/idm5.pdf>>
- BOURKE, P. 2012. *Polygon File Format* [online]. 2012 [cit. 2012-08-10]. Dostupné z <<http://paulbourke.net/dataformats/ply/>>.
- CENIA. 2012. Použití mapových služeb externími aplikacemi [online]. 2012 [cit. 2012-06-12]. Dostupné z <<http://geoportal.gov.cz/web/guest/wms/>>.

- DANIEL, G. M. 2009. *CloudCompare* [online]. 2009 [cit. 2012-07-04]. Dostupné z http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_4.pdf. Manuál k software ClouCompare.
- DOLANSKÝ, T. 2004. Lidary a letecké laserové skenování [online]. 2004 [cit. 2012-08-03]. Dostupné z <<http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>>.
- Geoid EGM 2008 GIS Data. [online]. Springfield : National Geospatial-Intelligence Agency. 2009 [cit 2012-08-20]. Dostupné z <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html>. Rastrová vrstva s hodnotami převýšení geoidu EGM 2008 a elipsoidu WGS 84.
- Esri. 2008. *The Multipatch Geometry Type* [online]. 2008 [cit. 2012-08-10]. Dostupné z: <<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/multipatch-geometry-type.pdf>>.
- Fileinfo.com. 2012. *ASC File Extension* [online]. 2012 [cit. 2012-08-02]. Dostupné z <<http://www.fileinfo.com/extension/asc>>.
- HOLEŠINSKÝ, O. 2012. Rozměry brány [email]. BRÝDL, I. 2012-08-08 [cit. 2012-08-17].
- MeshLab Documentation. [online]. 2009. University of Pisa. 2009 [cit. 2012-07-13]. Dostupné z <<http://www.cyi.ac.cy/system/files/MeshLab%20Documentation1.pdf>>. Manuál k software MeshLab.
- Pravčická brána. 2007. *Výletní zámček Sokolí hnízdo* [online]. 2007 [cit. 2012-06-26]. Dostupné z <<http://www.pbrana.cz/>>.
- Spatialreference.org. 2012. *EPSG:32633* [online]. 2012 [cit 2012-08-12]. Dostupné z <<http://spatialreference.org/ref/epsg/32633/>>.
- VÚGTK, 1998. *Geodetické referenční systémy v České republice* [online]. 1. vyd. Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 1998 [cit. 2012-08-02]. Dostupné z <http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/cd/cd_zak/systemy/start.htm>.
- VÚGTK, 2012. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. 2012 [cit. 2012]. Dostupné z <<http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>>.
- ZHANG, K. ; ZHENG, C. 2007. *Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools* [online]. 2007 [cit. 2012-07-05]. Dostupné z <<http://lidar.ihrc.fiu.edu/download/Doc/ALDPAT.pdf>>. Manuál k software ALDPAT.

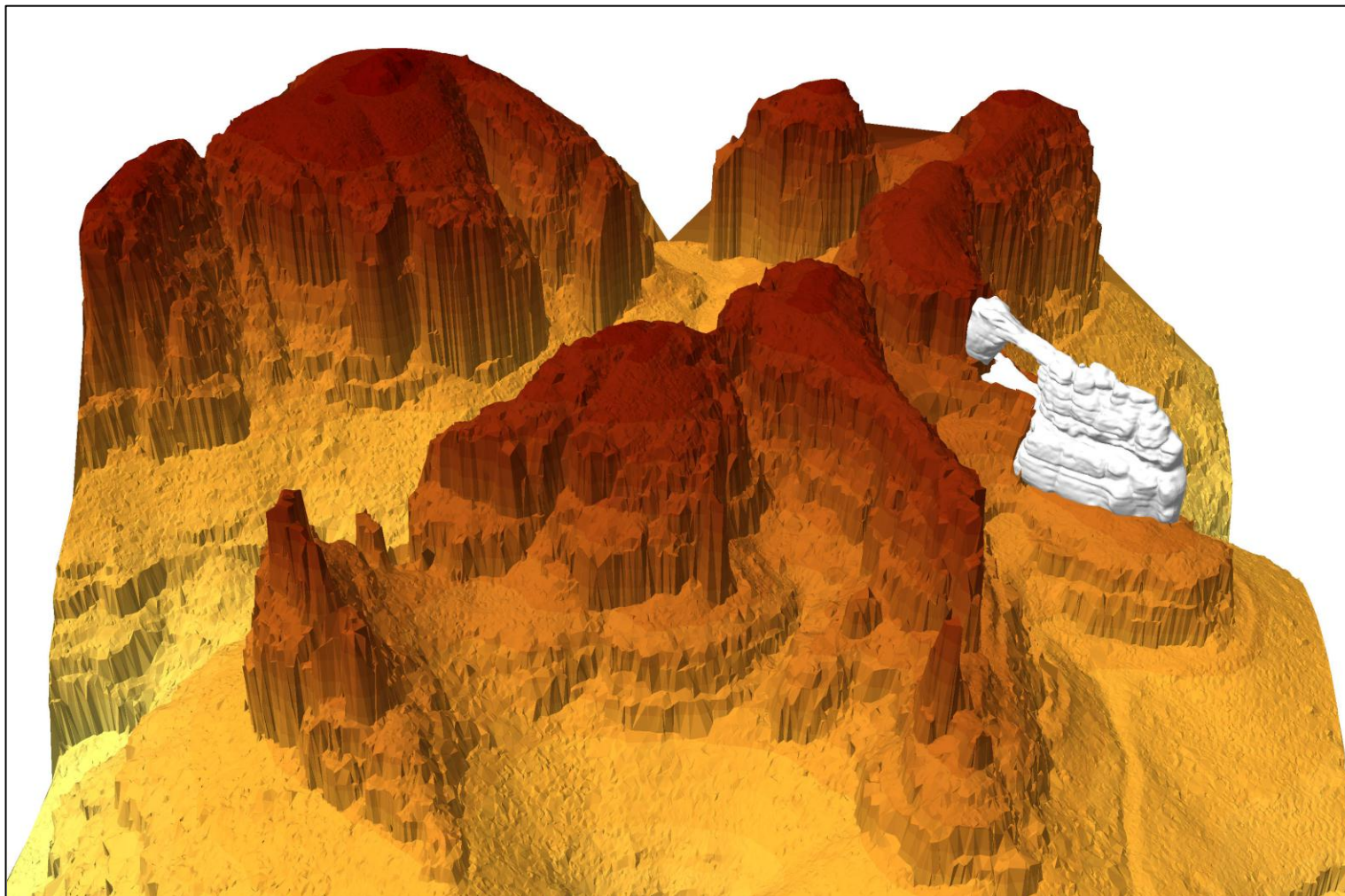
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Pohled na celou scénu ze západu

Příloha 2 Pohled na celou scénu ze severozápadu

Příloha 3 DVD-ROM

Příloha 1: Pohled na celou scénu ze západu



Příloha 2: Pohled na celou scénu ze severozápadu.

